Probleme der Produktionsplanung bei Mehrprodukten-Mehrstufenfertigung

Inaugural—Dissertation

zur Erlangung des Doktorgrades einer

Hohen Rechts- und Wirtschaftswissenschaftlichen Fakultät

(Wirtschaftswissenschaftliche Abteilung)

der Eberhard-Karls-Universität zu Tübingen

vorgelegt von

Ulrich Pfaffenberger

aus Berlin

1963

7676

Probleme der Produktionsplanung bei Mehrprodukten-Mehrstufenfertigung

Inaugural—Dissertation

zur Erlangung des Doktorgrades einer

Hohen Rechts- und Wirtschaftswissenschaftlichen Fakultät

(Wirtschaftswissenschaftliche Abteilung)

der Eberhard-Karls-Universität zu Tübingen

vorgelegt von

Ulrich Pfaffenberger

aus Berlin

1963

R. UNIV. BIBLIOTHEEK LEIDEN

Dekan: Professor Dr. rer. pol. Karl Brandt
Erstberichterstatter: Professor Dr. rer. pol. Dieter Pohmer
Zweitberichterstatter: Professor Dr. rer. nat. Heinrich Strecker
Tag der mündlichen Prüfung: 21. Februar 1963

Probleme der Produktionsplanung bei Mehrprodukten-Mehrstufenfertigung

	Seite
1. Einführung	1
1.1 Begriffliche Abgrenzung	1
1.2 Plan und Ziel der Untersuchung	6
2. Probleme der Produktionsplanung bei Massen- und Serienfertigung	9
2.1 Planungsprobleme mit Zuordnungscharakter	10
2.11 Möglichkeiten und Grenzen des linearen Planungsansatzes	11
2.111 Prinzip des linearen Planungsansatzes	11
2.112 Traditionelle Produktionstheorie und linearer Planungsansatz	14
2.113 Betriebswirtschaftliche Voraussetzungen für den linearen Planungsansatz	20
2.114 Linearisierter konvexer Planungsansatz	25
2.115 Linearer und linearisierter konvexer Planungsansatz und das Ertragsgesetz	28
2.12 Produktionsglättung (zeitlicher Produktionsausgleich)	33
2.121 Modell einer Produktionsglättung für ein Gut	34
2.122 Modell einer Produktionsglättung für mehrere Güter	39
2.13 Eigenfertigung - Fremdbezug	46
2.131 Einfaches Modell einer Planung Eigenfertigung - Fremdbezug	48
2.132 Verbessertes Modell einer Planung Eigenfertigung - Fremdbezug	50
2.14 Innerbetriebliche Zuordnungsprobleme	58
2.141 Zuordnung der Produkte auf Fertigungsverfahren	58

Seite

2.142 Ermittlung der optimalen Produktkombination und Zuordnung auf Fertigungsverfahren 61

2.143 Zwei Beispiele für spezielle Zuordnungen 69

2.1431 Innerbetriebliche Transportplanung 69

2.1432 Ein Mischungsproblem 73

2.15 Zusammenfassung 76

2.2 Teile-Einsatzplanung 78

2.21 Problemstellung 78

2.22 Ermittlung des Gesamt-Teilebedarfs 81

2.23 Terminplanung für die Teile-Einsatzplanung 90

2.24 Z usammenfassung 96

2.3 Ablaufplanung 99

2.31 Losgröße, Durchlaufzeit und Zwischenlager 102

2.311 Problemstellung 102

2.312 Theoretisch erforderliche Zwischenlager 105

2.313 Berücksichtigung der Transportkosten 112

2.314 Theoretisch erforderliche Zwischenlager und optimale Losgröße 116

2.315 Zusammenfassung 127

2.32 Durchfluß und Maschinenbelegung 130

2.321 Problemstellung 130

2.322 Exakte Planungsverfahren 135

2.323 Hinweise auf Näherungslösungen 148

2.33 Erweiterung: Durchfluß, Maschinenbelegung und Zwischenlager bei losreihenfolgeabhängigen Maschinenumstellzeiten 156

2.331 Problemstellung 156

Seite

2.332 Exaktes Produktionssteuerungsverfahren 161

2.333 Näherungsverfahren für die Produktionssteuerung 164

2.334 Auswahlzwischenlager als Planungsgröße des Problems 175

2.335 Zusammenfassung 177

2.34 Terminplanung als Kriterium der Ablaufplanung 179

3. Probleme der Produktionsplanung bei Einzelfertigung und Mischformen der Fertigungsbedingungen 185

4. Schlußbetrachtung: Die ökonomische Bedeutung exakter und quantitativer Produktionsplanungsmethoden 194

5. Zusammenfassung 201

6. Literaturverzeichnis (zugleich Namenregister) 206

Lebenslauf 217

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41547601_0019

1. EINFÜHRUNG

1.1 Begriffliche Abgrenzung

Das betriebswirtschaftliche Handeln kann grundsätzlich in zwei Kategorien eingeteilt werden: 1. Es sind Entscheidungen "konstitutiver Art"[1] zu treffen und durchzuführen, die den Betrieb als solchen, also seinen Aufbau, sein Ziel und seinen Bestand überhaupt betreffen. 2. Es sind Entscheidungen dispositiver Art zu treffen und durchzuführen ("situationsbedingte Entscheidungen"[1]), die den durch die konstitutiven Entscheidungen gesteckten Rahmen ausfüllen, die also das Laufen des Betriebes und das Erreichen des Betriebszieles betreffen. Entscheidungen konstitutiver Art wären etwa: Wahl der Rechtsform, des Standorts, der leitenden Personen, der Organisation im Großen, des Betriebsprogrammes, der Investitionen, der betrieblichen Sozialpolitik u.ä.. Für die Entscheidungen dispositiver Art wären Beispiele: die kurz- und mittelfristige Planung von Beschaffung, Produktion, Lagerung, Vertrieb, Wahl der Organisation im Kleinen, Regelung des Informations- und Wirk-ablaufs u.ä. Die Übergänge sind freilich fließend (z.B. bei Investitionen).

Die konstitutiven Entscheidungen sind in der Marktwirtschaft das eigentliche Gebiet des Unternehmerischen. Hier dienen quantitative (wie Preise, Mengen, Steuern), aber vor allem qualitative Informationen (wie Rechtsordnung, Beurteilung der allgemeinen Wirtschaftslage u.ä.) als Entscheidungskriterien, und die Entscheidungen werden oft in einer objektiv und exakt nicht zu beurteilenden Weise gefällt. Es sind dies die Entscheidungen, die z.T. weit in die Zukunft wirken und die zu einem großen Teil auf der subjektiven Einschätzung der Zukunft durch den Unternehmer beruhen. Exakte und quantitative Überlegungen werden nur angestellt, wenn die Entscheidung für ein Vorgehen mehr oder weniger festliegt und lediglich zwischen mehreren möglichen Wegen gewählt werden muß; beispielsweise, wenn für eine Ausrüstungsinvestition mehrere Maschinentypen in Frage kommen.

---

1) C. Sandig: Die Führung des Betriebes - Betriebswirtschaftspolitik, Stuttgart 1953, S. 95

Die Theorie behandelt dementsprechend diesen Fragenkomplex allgemein beschreibend[2] oder nur in den grundsätzlich quantifizierbaren Faktoren deduktiv und exakt[3].

Anders ist es bei den dispositiven, laufenden Entscheidungen. Für diese ist es sinnvoll, ja notwendig, exakte Methoden und Verfahren anzugeben. Denn wenn die grundsätzlichen, konstitutiven Entscheidungen getroffen sind, dann ist damit auch der Kranz der für die laufenden Dispositionen erforderlichen Daten gegeben, und es gilt, die Dispositionen so zu treffen, daß im Sinne des Betriebszieles optimal verfahren wird. Bei gegebenem Datenkranz und Optimierungskriterium kann das aber mit Hilfe exakter und quantitativer Analysen geschehen. Die quantitativen Methoden sollen also, indem sie optimale Verfahrensmöglichkeiten ermitteln, die eigentlichen unternehmerischen Entscheidungen nicht ersetzen, können aber deren quantitative Auswirkungen angeben und insofern sie beurteilen und ergänzen.

Mit ausgewählten Problemen der zweiten Art, also Problemen der dispositiven Entscheidungen, soll sich diese Arbeit beschäftigen. Ausgewählt sind einige Fragen der Produktionsplanung in Mehrprodukten-Mehrstufen-Industriebetrieben. Die Arbeit beschränkt sich darauf, Erfordernisse und Verfahren der Planung der Produktion, nämlich der Fertigungseingabe und des Fertigungsdurchlaufes (einschließlich der Terminplanung und der Zwischenlagerung) zu untersuchen, und zwar für solche industriellen Betriebe, die mehrere Produkte gleichzeitig herstellen und deren Fertigung in mehreren

---

2) z.B.: K. Mellerowicz: Allgemeine Betriebswirtschaftslehre, 7. Aufl., Berlin 1952; W. Rieger: Einführung in die Privatwirtschaftslehre, 2. Aufl., Erlangen 1959

3) z.B.: R.G.D. Allen: Mathematical Economics, London 1957; E. Schneider: Wirtschaftlichkeitsrechnung. Theorie der Investition, Tübingen und Zürich 1957; W. Krelle: Theorie wirtschaftlicher Verhaltensweisen, Meisenheim und Wien 1953

aufeinanderfolgenden Stufen geschieht. Die Behandlung des Mehrprodukten-Mehrstufenbetriebes bedeutet keine eigentliche Einschränkung, denn der Einprodukten- und der Einstufenfall sind die wesentlich einfacheren Probleme und sind logisch als Spezialfall im Mehrprodukten-Mehrstufenfall enthalten.

Setzt man das Produktionsprogramm als konstitutive Vorentscheidung voraus, so bestehen zwischen allen Planungen der wesentlichen Teilbereiche eines Industriebetriebes, zwischen Beschaffungsplanung, Finanzplanung, Absatzplanung und Produktionsplanung Wechselbeziehungen und gegenseitige Abhängigkeiten. Ausgangspunkt der betrieblichen Planung als Ganzheit ist im allgemeinen der Absatzplan; die Finanzierungsmöglichkeiten, die Kapazitätsgrenzen und u.U. Engpässe in der Versorgung mit den Einsatz-Gütern setzen einem realisierbaren Absatzplan nur kurzfristig obere Grenzen und werden langfristig den Erfordernissen des Absatzplans angeglichen (Gutenberg spricht in diesem Sinne von einem "Ausgleichsgesetz der Planung"[4]). Analysiert man Fragen der Produktionsplanung, so ist es daher gerechtfertigt, einen für die Planungsperiode gegebenen Absatzplan vorauszusetzen. Davon soll auch in dieser Arbeit ausgegangen werden. Wie der Absatzplan zustande kommt und die prinzipielle Bedeutung von Unsicherheit und Risiko im Absatzplan soll also nicht erörtert werden. Die Wechselbeziehungen zwischen Absatzplan und Produktionsplan werden dadurch nicht ignoriert. Unsicherheiten des Absatzplanes kann durch Aufstellung alternativer Produktionspläne Rechnung getragen werden. Hierbei müssen die durch die Planung zu veranlassenden Vorbereitungen für mehrere Alternativen getroffen werden, die sich teils gleichen, teils unterscheiden werden, so daß mit zusätzlichen Kosten zu rechnen ist. Welche der Alternativen realisiert wird, braucht erst unmittelbar vor dem Fertigungsbeginn entschieden zu werden, wenn die Infor-

---

4) E. Gutenberg: "Planung im Betrieb", Zeitschrift für Betriebswirtschaft, 22. Jg. (1952), S. 669-684, hier S. 674

mationen für die Absatzplanung vielleicht schon besser geworden sind. Auch die Annahme von Wahrscheinlichkeitsverteilungen über den Absatz ändert an der Unsicherheit prinzipiell nichts, sondern ist nur ein methodischer Weg zur Entscheidung für einen bestimmten Absatzplan. Von dieser formalmethodischen Verfeinerung soll daher in dieser Arbeit nicht weiter Gebrauch gemacht werden.

In diesem Sinne hat die Produktionsplanung die Aufgabe, die gemäß dem Absatzplan in der Planungsperiode zu fertigenden Produkte so auf die Betriebskapazitäten aufzuteilen, daß das Betriebsziel erreicht wird. Solche Ziele können etwa sein: Produktion vorgegebener Mengen zu geringsten Kosten; Produktion so, daß die Betriebskapazitäten in der Planungsperiode gleichmäßig ausgelastet werden; Produktion so, daß ein maximaler Umsatz erzielt wird; Produktion so, daß bestimmte (zugesagte) Termine möglichst eingehalten werden; Kombinationen derartiger Ziele, wobei, da die Ziele sich z.T. widersprechen (können), obere und untere Grenzen für die Einzelziele angegeben werden müssen mit solchen Schranken, daß deren Kompatibilität gewahrt bleibt. Die Wahl des Zieles ist eine konstitutive Vorentscheidung des Unternehmers; die Produktionsplanung setzt diese Entscheidung voraus. Zu den Problemen der Produktionsplanung gehört somit die Regelung der Fertigungseingabe, des Fertigungsdurchlaufs, der Terminplanung und der Zwischenlagerung.

Die Literatur grenzt den Begriff der Produktionsplanung nicht einheitlich und nicht durchweg so kurzfristig und technisch (im allgemeinen Sinne zielentsprechenden Mitteleinsatzes) wie wir, aber ähnlich ab:
Gutenberg nennt die oben definierte Produktionsplanung "Vollzugsplanung". "Die Planung des Fertigungsprogrammes findet ihre Ergänzung in der Planung des Fertigungsprozesses. Diese Planung wollen wir als Vollzugsplanung bezeichnen. Sie setzt voraus, daß das Fertigungsprogramm gegeben ist. Es bildet mithin für die Vollzugs-

---

5) E. Gutenberg: Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre, Bd. 1: Die Produktion, 8./9. Aufl., Berlin-Göttingen-Heidelberg, 1963, S. 138

planung eine Art Datum (Vollzugsplanung gleich Durchführungsplanung)."[5]

Ellinger definiert umfassender: "Produktionsplanung ist die Planung der zukünftigen Produktion, d.h. ein auf die Zukunft gerichtetes ordnendes Denken, bei dem unter verschiedenen Möglichkeiten der Produktionsgestaltung Entscheidungen zu treffen sind. ... Die Produktionsplanung umfaßt die Planung des Produkts, die Planung des Produktionsprogrammes und die Planung der Produktionsdurchführung".[6] "Das Produktionsprogramm im engeren Sinne stellt als Ergebnis der Planung einen Produktionsplan für einen bestimmten Zeitabschnitt dar, der die in dieser Zeit zu fertigenden Produkte nach Art und Menge enthält. Dieser Produktionsplan baut auf dem Verkaufsprogramm auf ..."[7].

Mellerowicz führt aus: "Der Produktionsplan folgt im allgemeinen dem Absatzplan, nur in Ausnahmefällen geht er ihm voran. Aufgabe des Produktionsplanes ist die genaue Angabe der zu produzierenden Mengen und Arten der Erzeugnisse vor Beginn der Produktion verteilt auf die Produktionszeiten und Abteilungen. Sinn ist, den Ablauf der Produktion reibungslos zu gestalten, Leerlauf zu vermeiden und den Betrieb zu harmonisieren."[8]

John F. Magee definiert ähnlich wie hier: "The principal function of production scheduling is to obtain a smooth, timely flow of product manufacturing steps. It starts with the specification of what to make, from customer orders or from the operation of the inventory-control system. It includes the loading of items to be into manufacturing centers, and covers the dispatching of manufacturing instructions to operating centers."[9]

---

6) Th. Ellinger: Ablaufplanung, Stuttgart 1959, S. 14
7) Th. Ellinger: Ablaufplanung, Stuttgart 1959, S. 17
8) K. Mellerowicz: Allgemeine Betriebswirtschaftslehre, Bd. 3, 7. Aufl., Berlin 1952, S. 100
9) J.F. Magee: Production Planning and Inventory Control, New York, Toronto, London 1958, p. 203

1.2 Plan und Ziel der Untersuchung

Es ergibt sich für diese Untersuchung fast eine natürliche Reihenfolge.

Zuerst gilt es, das Problem der Anpassung der Produktion an den Absatzplan, also das Problem des zeitlichen Produktionsausgleichs oder allgemein der Produktionsglättung näher zu betrachten. Hiermit hängt zusammen die grundsätzliche Entscheidung über das Maß von Eigenfertigung und Fremdbezug. Liegt diese fest, so ist zu bestimmen, welche Kapazitäten welche Arbeiten ausführen sollen. Diese drei Problemkreise lassen sich allgemein unter den Begriff der Zuordnungsprobleme subsumieren. Zur quantitativen Lösung derartiger Planungsaufgaben kommen in erster Linie die Methoden der Linearen Planungsrechnung in Betracht. Daher sollen diesem ersten Abschnitt einige Bemerkungen über Prinzipien, Voraussetzungen und Grenzen des linearen Planungsansatzes und über seinen Zusammenhang mit der traditionellen Produktionstheorie und dem Ertragsgesetz vorausgeschickt werden.

Im zweiten und dritten Abschnitt sollen einige Probleme der rein innerbetrieblichen Produktionsplanung, soweit sie nicht Zuordnungscharakter haben, behandelt werden, die speziell beim Fertigungsdurchlauf mehrerer Arten von Produkten durch mehrere Fertigungsstufen auftreten. Dabei soll im allgemeinen davon ausgegangen werden, daß die Fertigung rein betriebstechnisch in Werkstattproduktion oder in Reihenfertigung ohne Zeitzwang (im Sinne Gutenbergs [10]) vor sich geht; denn hier treten wegen der nicht vorhandenen zeitlichen und kapazitativen Harmonisierung die eigentlichen ökonomischen (und nicht nur organisatorischen) Planungsprobleme auf. Es sind dies Probleme wie Berechnung von Teile-Einsatz-Mengen, Losgröße, Durchlaufzeit, Zwischenlager, Terminplanung, Maschinenbelegung und Maschinenumstellzeiten (insbesondere auch bei Abhängigkeit von der Losreihenfolge).

10) E. Gutenberg: Grundlagen ..., 1. Bd., a.a.O., 3/9. Aufl., S. 76

Die Erörterungen der ersten drei Abschnitte gehen von größeren zu fertigenden Stückzahlen, also von einer Massen- oder Serienfertigung aus. Im vierten Abschnitt sollen einige Überlegungen über die Gültigkeit des für die Planung bei Massen- und Serienfertigung Ausgesagten für die Produktionsplanung bei Einzelfertigung angestellt werden.

Alle Überlegungen sollen dem Zweck dienen, auf die Möglichkeiten der betriebswirtschaftlichen Anwendung und den Ansatz quantitativer und exakter Planungsrechnungen hinzuweisen. Es geht hier nicht darum, theoretisch und spektulativ neue methodische Ansätze und Erweiterungen zu entwickeln. Wir bescheiden uns hier damit, die Lösungsmethoden, soweit sie bekannt sind und für eine Anwendung hinreichend erscheinen, ohne ausführliche Beschreibung zu übernehmen (das gilt besonders für die lineare Planungsrechnung), und nur dort die nötigsten theoretisch-methodischen Erörterungen anzustellen, wo das Rüstzeug bislang nicht oder nur unzureichend entwickelt zu sein scheint (das gilt besonders für einige Probleme bei der Ablaufplanung). Dementsprechend werden wir uns nicht auf mathematisch genaue Ansätze und Lösungen versteifen, sondern häufig mit offenbar hinreichenden Näherungslösungen begnügen.

Neben den Methoden selbst verdient auch dieser Einbau der Methoden in die wirtschaftliche Anwendung wissenschaftliches Interesse, sonst wären sie, da sie im allgemeinen nicht zweckfrei entwickelt werden, zu luftleeren Theorien abgewertet. Nachdem die quantitativen Planungsmethoden in vielfältiger Weise theoretisch und deduktiv entwickelt wurden, gilt es, sie zu konkretisieren. Denn den quantitativen Planungsmethoden kommt nicht nur im Hinblick auf die tiefere Analyse des Betriebsprozesses zur Weiterentwicklung der Theorie der Produktion und der Wirtschaftstheorie schlechthin eine Bedeutung zu, sondern diese lassen sich unmittelbar einzelwirtschaftlich verwenden, nachdem durch die Elektronenrechner einsatzfähige Werkzeuge geschaffen wurden, welche nach einem mathematisch auch anspruchs-

vollen, logistischen Kalkül mit großen Zahlenmengen schnell rechnen können und mit einer bloßen Abrechnung im buchhalterischen Sinne unvollkommen ausgenutzt sind. Läßt sich das nachweisen, so ist es um so mehr gerechtfertigt, derartige Planungsansätze für andere wirtschaftstheoretische Überlegungen allgemein und für verhaltenstheoretische Argumentationen besonders zugrunde zu legen. Die Untersuchungen hier sind demgemäß bewußt pragmatisch ausgerichtet, ohne allerdings auf spezielle praktische Fälle und Beispiele eingehender Bezug zu nehmen.

Die (an sich interessante) Frage der organisatorischen Verwirklichung in Art und Umfang veränderter Produktionsplanungen gehört nicht unmittelbar hierher und wurde nur dort berührt, wo ihr prinzipielle Bedeutung zukommt (z.B. bei minimalem losgrößenabhängigen Zwischenlager).

2. Probleme der Produktionsplanung bei Massen- und Serienfertigung

Jede Produktionsplanung ist im Prinzip quantitativ, gleichgültig, ob in einer Planungsperiode ein oder mehrere Stücke eines Gutes oder mehrere Güter simultan oder nacheinander hergestellt werden sollen. Quantitäten sind die Gegebenheiten des Betriebes und des Absatzes wie etwa: Stückzahl, Zahl und Kapazität der Fertigungsstationen, Bearbeitungszeiten, Lagerzeiten und die diesen Größen entsprechenden Kostenwerte. Auf der Basis derartiger Größen wird über Art, Zeit und Menge der Fertigung für die einzelne Planungsperiode entschieden. Es ist klar, daß methodische Probleme der Produktionsplanung erst auftreten, wenn das zugrunde liegende Planungsproblem so umfangreich und mehrschichtig und unübersichtlich ist, daß seine Lösung nicht einfach auf der Hand liegt. Eine bewußte, rechnerische Produktionsplanung wird daher in der Regel weniger in kleinen Betrieben und bei (mehr oder weniger handwerklicher) Einzelfertigung, sondern vor allem in größeren Betrieben oder bei (industrieller) Massen- und Serienfertigung angebracht sein. Denn in solchen Betrieben wird meist für einen größeren Markt produziert, die Güter können also in größeren Stückzahlen in einer vom Betrieb selbst bestimmbaren gleichmäßigen Qualität und Art und Menge hergestellt werden. Dementsprechend werden die Arbeitsverrichtungen auch für verschiedene Güter in möglichst gleichartige Arbeitsgänge aufgeteilt, die weitgehend mechanisiert werden, denen also bestimmte Kapazitäten eindeutig zugeordnet werden. Im Gegensatz zur Einzelfertigung, bei der Konstruktion, Art, Qualität und Termin der Produkte oft individuell vereinbart werden, so daß sich die Produktionsplanung im wesentlichen auf die technische Arbeitsvorbereitung beschränkt und nur bei der simultanen Einzelfertigung mehrerer Güter ähnliche Probleme bestehen können, tauchen bei der Massen- und Serienfertigung die eigentlichen Planungsprobleme auf; denn nicht nur durch technisch-organisatorische Maßnahmen, sondern durch planvolles Vorgehen in Bezug auf die durch den Betrieb frei wählbaren Regelgrößen: was, wann? wieviel, wann? wie viel, wie? kann das Betriebs-

ziel angestrebt werden. Im folgenden soll daher zunächst von der Massen- und Serienfertigung, d.h. von der Fertigung mehrerer Stücke mehrerer Güter in einer Planungsperiode auf z.T. den gleichen Fertigungsaggregaten, ausgegangen werden. Später (S. 185 ff.) soll erörtert werden, wie weit die für die Massen- und Serienfertigung gültigen Produktionsplanungsmethoden und -regeln auch für die Mehrprodukten-Mehrstufenproduktion bei Einzelfertigung brauchbar und richtig sind.

2.1 Planungsprobleme mit Zuordnungscharakter

Bei einem Teil dieser Planungsaufgaben handelt es sich um Zuordnungsprobleme, bestimmte Produkte oder Mengen sollen bestimmten Verfahren oder Kapazitäten so zugeordnet werden, daß bestimmte Zielsetzungen erfüllt werden. Man denke an das Problem des zeitlichen Produktionsausgleichs, an die Aufteilung der zu produzierenden Mengen auf die Maschinenkapazitäten, an die örtliche Aufteilung der zu produzierenden Mengen, wenn für das gleiche Produkt verschiedene Fertigungsstätten bestehen, die unterschiedlich nahe an den Absatzgebieten sind, an die Ermittlung zieloptimaler Mischungsverhältnisse beim Materialeinsatz (z.B. Beschickung eines Hochofens mit unterschiedlichen Erzen, deren Gestehungskosten ungleich sind) u.ä.

Die traditionelle Produktionstheorie[11] ist für derartige Probleme, die sie quantitativ nicht oder nur unzureichend lösen konnte und wollte, ergänzt worden durch das lineare Programmieren. Da dem linearen Planungsansatz für einen Teil der betrieblichen Planung eine wesentliche Bedeutung zukommt, sollen hier, bevor einzelne Zuordnungsprobleme näher beleuchtet werden, seine Grundsätze, Möglichkeiten und Grenzen in der Anwendung vor die Klammer gezogen und allgemein diskutiert werden, damit die Probleme von vornherein so

---

11) vgl. etwa die Darstellung bei E. Schneider: Theorie der Produktion, Wien 1934

formuliert werden können, daß ihre spezielle praktische Lösbarkeit sofort beurteilt werden kann.

2.11 Möglichkeiten und Grenzen des Linearen Planungsansatzes

Über die Methoden des Linear Programming gibt es ausführliche Literatur[12], so daß wir uns hier auf das Herausschälen der Prinzipien beschränken können.

2.111 Prinzip des Linearen Planungsansatzes

Jedes zuordnerische Planen bedeutet im Rahmen der Gegebenheiten eine Entscheidung zwischen mehreren Möglichkeiten des Vorgehens; d.h. die für das Problem relevanten Einflußmöglichkeiten sollen so abgewogen werden und die Entscheidung für ein bestimmtes Vorgehen soll so getroffen werden, daß ein gegebenes Ziel möglichst weit angenähert wird. Die Problemstellung eines solchen Planungsansatzes im Betrieb ist allgemein:

1. Man hat gewisse Aktivitäten, d.h. mögliche Ausbringungen nach einer der möglichen Faktorkombinationen. Im Industriebetrieb ist beispielsweise ein nach einer bestimmten Fertigungsweise hergestelltes Produkt eine Aktivität; kann das gleiche Produkt auf verschiedene Weise hergestellt werden, so stellt jede einzelne Möglichkeit der Fertigung eine Aktivität dar, obgleich es sich

---

12) Z.B.: M. Beckmann: Lineare Planungsrechnung, Ludwigshafen 1959 (mit ausführlichem Literaturverzeichnis); Charnes, Cooper, Henderson: An Introduction to Linear Programming, New York 1953; Dorfman, Samuelson, Solow: Linear Programming and Economic Analysis, New York 1958; S. Gass: Linear Programming - Methods and Applications, New York 1958; A. Vaszonyi: Scientific Programming in Business and Industry, New York 1958; W. Wetzel: Theoretische Grundlagen des linearen Programmierens, der Einsatz-Ausstoß-Analyse und der Spieltheorie; in: Anwendungen der Matrizenrechnung auf wirtschaftliche und statistische Probleme, Einzelschriften der Deutschen Statistischen Gesellschaft, Nr. 9, Würzburg 1959, S. 129-183

um das gleiche Produkt handelt. Zwischen diesen Aktivitäten an Hand gegebener Zielkriterien (s. weiter unten) auszuwählen, ist Sinn der Planung.

2. Man hat gewisse Produktionsfaktoren j, z.B. Maschinen. Jeder der Produktionsfaktoren ist im allgemeinen nach oben hin in seiner Kapazität begrenzt, b_j.

3. Bekannt sind die technischen Koeffizienten, die den Bedarf an Faktoren für die Einheit einer jeden Aktivität angeben (z.B. Maschinenminuten der Maschine j für ein nach Methode i hergestelltes Produkt).

In tabellarischer Übersicht zeigt sich das so:

Matrix der technischen Koeffizienten
(Bedarf an Faktor j für eine Einheit der Aktivität i)

Faktoren Aktivitäten (Produkte)	1	2	3	...	j	...	m
1	a_{11}	a_{12}	a_{13}	...	a_{1j}	...	a_{1m}
2	a_{21}	a_{22}	a_{23}	...	a_{2j}	...	a_{2m}
3	a_{31}	a_{32}	a_{33}	...	a_{3j}	...	a_{3m}
.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.
i	a_{i1}	a_{i2}	a_{i3}	...	a_{ij}	...	a_{im}
.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.
n	a_{n1}	a_{n2}	a_{n3}	...	a_{nj}	...	a_{nm}
Faktorenkapazität	b_1	b_2	b_3	...	b_j	...	b_m

4. Gesucht ist das Aktivitätsniveau für jede Aktivität i; d.h. gesucht sind die Mengen, die nach den Methoden i hergestellt werden sollen. Und zwar sollen diese Mengen x_i so ausgewählt werden, daß ein bestimmtes Ziel möglichst weit erreicht wird. Für jede Aktivität i muß daher der Faktor bekannt sein, mit dem sie diese Zielgröße beeinflußt. Ziel und Zielkoeffizienten werden im allgemeinen Kosten- oder Gewinngrößen sein. Als Ziel kommt beispielsweise Kostenminimierung oder Gewinnmaximierung in Frage; für jede Aktivität müssen dann die variablen Kosten c_i oder eine Stückgewinngröße g_i bekannt sein.

Ein linearer Planungsansatz ist dann möglich, wenn die Koeffizienten a_{ij}, b_j und c_i bzw. g_i konstant sind. Seine Gleichungen lauten dann in der Formulierung als Maximumproblem:

(1) $$\sum_{i=1}^{n} g_i x_i = \text{Maximum!}$$

unter den Nebenbedingungen:

(2) $$\sum_{i=1}^{n} a_{ij} x_i \leq b_j \qquad (j = 1...m)$$

(3) $$x_i \geq 0 \qquad (i = 1...n)$$

Wenn für einzelne Aktivitäten, wie es die Regel sein wird, schon Mindest- und/oder Höchstmengen festliegen, gibt es zusätzlich Nebenbedingungen, durch die die Gleichung (3) präzisiert wird:

(3a) $$M_i \leq x_i \leq H_i \qquad (i = 1...n)$$

Ein solches Gleichungssystem (2) und (3), das im allgemeinen unterbestimmt ist, weil mehr Variable als Gleichungen vorhanden sind, ist bei gegebener Zielfunktion (1) grundsätzlich lösbar. "Fragen nach der Existenz von Lösungen spielen im Linear Programming keine bedeutende Rolle. Ein sinnvoll formuliertes ökonomisches Problem muß auch eine Lösung besitzen"[13]. Die übliche Lösung,

13) M. Beckmann: Lineare Planungsrechnung, a.a.O., S. 26

für die auch Standardprogramme für die Elektronenrechner zur Verfügung stehen, ist die nach der "Simplex-Methode" von G.B. Dantzig[14]. Unter besonders einfachen Bedingungen kommt für die rechnerische Lösung von Linearen Planungsansätzen die "Transportmethode", die auf Hitchcocks[15] Überlegungen basiert, in Frage.

Zwei Fragen drängen sich nun auf. Einmal: Worin unterscheidet sich ein solcher Ansatz von der bisherigen Produktionstheorie; ist er neu? Zum anderen: Welche Voraussetzungen müssen für die betriebswirtschaftliche Anwendung eines linearen Planungsansatzes erfüllt sein; ist er anwendungsfähiger als die bisherigen Ansätze und wo liegen seine Grenzen?

2.112 Traditionelle Produktionstheorie und linearer Planungsansatz[16]

Als traditionelle Produktionstheorie seien Erörterungen mit folgenden Annahmen bzw. Gegebenheiten bezeichnet:

1. Es ist nur ein Gut herzustellen oder, wenn mehrere Güter herzustellen sind, durch Produktionsart und -menge eines Gutes werden Produktionsart und -menge der anderen Güter nicht beeinflußt.

---

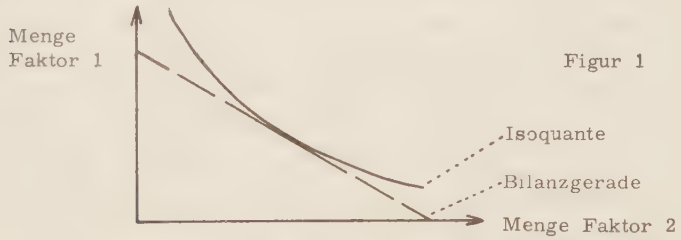
14) G.B. Dantzig: "The Programming of Interdependent Activities", Econometrica, Vol.17 (1949), pp.200-211; durchgesehen später in: Activity Analysis of Production and Allocation (Hrsg. T.C. Koopmans), New York 1951, pp.19-32. S.a.: Charnes, Cooper, Henderson a.a.O., pp. 57-74 und F. Ferschl: "Die Simplexmethode zur Lösung linearer Programme", in: Anwendungen der Matrizenrechnung... a.a.O., S.184-209

15) F.L. Hitchcock: "The Distribution of a Product from Several Sources to Numerous Localities", Journal of Mathematics and Physics 20 (1941), pp. 224-230. S.a.: E.H. Bowman und R.B. Fetter: Analysis for Production Management, Homewood, Ill., 1957, pp.106-129; H.S. Houthakker: "On the Numerical Solution of the Transportation Problem", Operations Research, Vol.3 (1955), pp.210-214; und W. Knödel: "Ein verallgemeinertes Transportproblem", Unternehmensforschung, Bd. 4 (1960), S. 1-12

16) Es soll hier nur das Wesentliche herausgeschält werden. Eine ausführliche und grundsätzliche Darstellung des Zusammen-

2. Die Produktionsfaktoren sind kontinuierlich substituierbar; im Substitutionsbereich ist eine unendliche Zahl von Aktivitäten oder Prozessen für eine bestimmte Menge eines Gutes möglich. Es existiert ein Gesetz der abnehmenden Rate der Substitution.

Daraus folgt dann die Minimalkostenkombination für jedes Gut. Diese liegt bei dem Punkt (Prozeß), wo das Verhältnis der Faktorpreise gleich dem Verhältnis der Grenzproduktivitäten der Faktoren ist. Geometrisch liegt die kostengünstigste Faktorenkombination für eine bestimmte Stückzahl eines Gutes und zwei Faktoren dort, wo die Bilanzgerade (die Gerade, die die Koordinatenachsen im Verhältnis der Preise der Faktoren schneidet) die Isoquante tangiert.



Figur 1

Die zweite Voraussetzung, Substituierbarkeit der Produktionsfaktoren, ist bei industrieller Produktion meistens nicht erfüllt. Besonders Gutenberg zweifelt die Möglichkeiten zur beliebigen, "peripheren"[17] Substitution zwischen den Faktoren an (und stellt damit auch die Gültigkeit des Ertragsgesetzes für die industrielle Produktion in Frage, vgl. dazu S. 28 ff.). Die Produktionsfaktoren sind vielmehr für die meisten Produktionsprozesse limitational, es

16) Forts. - hangs findet man bei: W. Wittmann: "Lineare Programmierung und traditionelle Produktionstheorie", Z f hand Forsch N F, 12. Jg. (1960), S. 1-17; M. Beckmann: "Linerares Programmieren und neoklassische Theorie", Weltwirtschaftl. Archiv, Bd. 84 (1960), S. 39-52; S. Danø: "Linear Programming i Produktionstheorien", National Ø konomisk Tidsskrift, Teil 1 u. 2, Bd. 41 (1955), Teil 3, Bd. 42 (1956), und auch in den neueren Auflagen von E. Schneider: Einführung in die Wirtschaftstheorie, Teil II, (8. Aufl., Tübingen 1963, S. 152 ff.)

17) E. Gutenberg: Grundlagen..., a. a. O., Bd. 1, 8/9. Aufl., S. 204

gibt nur eine "alternative Substitution"[18]; diese ist die "Ersetzung eines Faktors oder einer Faktorgruppe durch einen anderen Faktor oder andere Faktorgruppe mit jeweils andersartigen Eigenschaften"[18]. Das ist bereits der Prozeß- oder Aktivitätsbegriff, der dem linearen Planungsansatz zugrunde liegt. Gutenberg denkt aber in seiner allgemeinsten Form der Produktionsfunktion B[19] nicht ausschließlich an linear-limitationale Produktionsfaktoren und somit konstante Produktionskoeffizienten, wie der lineare Planungsansatz, sondern auch an durch mengenabhängige Leistungsunterschiede der Faktoren verursachte variable Produktionskoeffizienten. Kilger[20] geht hier weiter und kommt zu den gleichen Voraussetzungen wie der lineare Planungsansatz, indem er nur den Fall konstanter Produktionskoeffizienten für wesentlich hält. Beide denken aber, indem sie die erste Voraussetzung, Unabhängigkeit der Produkte untereinander, gelten lassen, mittel- und langfristig und betrachten nicht das Kombinations- und Zuordnungsproblem, das entsteht, wenn man für mehrere Güter gleichzeitig die - insgesamt gesehen - günstigsten Faktorkombinationen bei gegebenen Beschränkungen (Faktorkapazitäten, Mengen der Güter) ermitteln will[21].

Zwei Gründe dürften für das Denken Gutenbergs entscheidend sein:
1. Irgendwelche Beschränkungen in den Mengen der Produktionsfaktoren braucht man für die längerfristige Analyse nicht zu berücksichtigen; die Faktoren dürften auf lange Sicht fast immer in den gewünschten Mengen beschafft werden können. Sind Beschränkungen

18) a.a.O., S. 194

19) a.a.O., S. 218 ff.

20) W. Kilger: Produktions- und Kostentheorie, Wiesbaden 1958, S. 68

21) Ein anderer Aspekt der simultanen Produktion mehrerer Güter ist die Verbundenheit der Nachfrage der Güter. Hierzu vgl. z.B. H. Brems: Product Equilibrium under Monopolistic Competition, Cambridge, Mass., 1951, pp. 100 und H. Spilker: "Die Bestimmung der gewinnmaximalen Absatzmengenkombination der Mehrproduktunternehmung und ihre Reaktion auf Nachfrageverschiebungen", Zeitschrift für die gesamte Staatswissenschaft, Bd. 112 (1956), S. 632-670

nicht vorhanden, oder ineffektiv, dann entfällt das Zuordnungsproblem, und man kann mit Recht die Überlegungen auf die Güter einzeln und nacheinander abstellen. 2. Wollte man dennoch von gegebenen Beschränkungen ausgehen und ganz allgemeine Produktionsfunktionen in der Art der neoklassischen Produktionstheorie für die verflochtene Produktion mehrerer Güter gleichzeitig aufstellen, so müßte man mit einer Matrix von technischen Koeffizienten rechnen, von denen jeder einzelne nicht konstant, sondern von den Ausbringungsmengen eines jeden diesen Faktor benutzenden Gutes abhängig wäre. Ein solches Problem ist zu umfangreich in seinen Rückkoppelungen und anspruchsvoll, als daß es mit den bekannten Mitteln der Mathematik gelöst werden könnte[22].

Nur für den Spezialfall der konstanten Produktionskoeffizienten läßt sich, seit 1949 das Simplex-Verfahren zur Lösung von Maximierungs- bzw. Minimierungsaufgaben linearer Funktionen unter linearen Nebenbedingungen gefunden wurde[23], das Zuordnungsproblem mehrerer Güter auf für sie alle erforderliche, beschränkte Faktoren lösen. Die lineare Planungsrechnung ist damit weniger allgemein als etwa der Ansatz Gutenbergs, und schon daraus ergibt sich, daß sie diesen nicht ersetzen, sondern nur ergänzen kann. Die Ergänzung liegt darin, daß nun auch der kurzfristige Aspekt, bei dem Beschränkungen grundsätzlich immer gegeben sind, in seiner Kombinationsproblematik beleuchtet werden kann.

Gegenüber der traditionellen Produktionstheorie beruht also der lineare Planungsansatz auf folgendem:

Man geht bei einigen oder allen Faktoren von gegebenen Kapazitäts-

22) Für Systeme von allgemeinen Funktionen existieren keine Sätze über Eindeutigkeit und Lösbarkeit; es gibt lediglich für bestimmte Voraussetzungen rechnerisch komplizierte Näherungslösungen. Die allgemeine Gleichungstheorie beschränkt sich im wesentlichen auf die Behandlung linearer Gleichungssysteme.

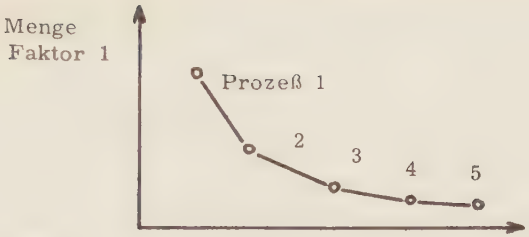
23) G.B. Dantzig, a.a.O. T.C. Koopmans, a.a.O., vgl. Anm. 14.

grenzen aus; ebenso unterstellt man für die Kombination der Produktionsfaktoren nicht beliebige Substitution, sondern man spezifiziert nur einige, tatsächlich durchführbare Prozesse. Interpolationen zwischen diesen Prozessen sind sinnlos. Ein Punkt zwischen zwei Prozessen gibt also nur eine Aufteilung auf diese beiden Prozesse an, definiert aber keinen neuen. "Die Beschreibung der Technik besteht jetzt in einer bloßen Angabe der Fabrikationskoeffizienten, wie sie Walras genannt hat, der technischen oder Inputkoeffizienten nach heutigem Sprachgebrauch. Sie geben an, wieviel von jedem Faktor in die Produktion einer Einheit der verschiedenen Produkte eingeht. Eine solche Tafel - auch technische Matrix genannt - ist die einfachste mögliche Produktionsfunktion. Wenn nun mehrere Produktionsmethoden für ein Produkt bestehen, dann müssen diese natürlich sämtlich aufgeführt werden. Deshalb und weil ein Prozeß auch mehrere Endprodukte haben kann - verbundene Produktion -, kann man die Prozesse nicht immer durch ein Produkt charakterisieren, sondern spricht allgemein von Produktionsaktivitäten"[24].

Diese technischen Koeffizienten werden (weniger allgemein als bei Gutenberg) als konstant, d.h. jeder Ausbringungsmenge eines Prozesses proportional angenommen. Diese Annahme steht nicht im Einklang mit dem Ertragsgesetz (vgl. die Ausführungen unter Punkt 2.115). Im Zwei-Faktoren-Fall können die frühere Isoquante die Geraden im Diagramm (Figur 2) sein. Sie müssen es nicht sein, weil man Prozesse (Aktivitäten) und nicht Produkte betrachtet und zunächst nichts über die Zuordnung von Produkten auf die Prozesse gesagt ist; der Polygonzug braucht also nicht nur für ein Produkt zu gelten. Die beste Faktorkombination ergibt sich auch hier wieder am Berührungspunkt der Bilanzgeraden mit der konvexen Fläche.

---

24) M. Beckmann: "Lineares Programmieren und neoklassische Theorie", Weltwirtschaftliches Archiv, Bd. 84 (1960), S. 43



Figur 2

Allen[25] schreibt zum Unterschied zwischen beiden Methoden: "In one respect the result is very similar to that of marginal analysis: the supplies of products by the firm vary with the given resources available and with the market prices of the products. The difference is that it is now not only a matter of varying the proportions in which processes are used, but also of switching from one process to an entirely different one".

Das Denken des linearen Planungsansatzes ist zunächst kurzfristig (was ihn in der Sicht des Theoretikers etwas abwerten und in seiner Erkenntniskraft schmälern lassen könnte); es enthält aber ein wesentliches langfristiges Moment: Bei der Rechnung fallen nebenbei für die Faktoren, die bis zur Grenze ausgenutzt werden, "duale Variable"[26] an, die Auskunft darüber geben, wie stark sich die Knappheit dieser Faktoren relativ auswirkt. Jeder der knappen Faktoren hat einen "Effizienzpreis"[27], der angibt, wieviel wert eine Erweiterung der Kapazität eines jeden knappen Faktors ist. Es werden also zusätzliche quantitative Informationen für die Investitionsentscheidungen geliefert. Einige Verfeinerungen und Weiterungen im linearen Planungsansatz (besonders durch die Aufstellung ganzzahliger Ansätze, s.a. weiter unten) lassen diesen auch direkt als

---

25) R.G.D. Allen: Mathematical Economics, London 1957, p. 636

26) vgl. Dorfman, Samuelson, Solow: Linear Programming, a.a.O. pp. 39-52; H. Winkel: "Das Dualproblem in der Linearen Planungsrechnung", Unternehmensforschung, Bd. 3 (1959), S. 118-129; und H.M. Wagner: "A Practical Guide to the Dual Theorem", Operations Research, Vol. 6 (1958), pp. 364-384

27) M. Beckmann: Lineare Planungsrechnung, a.a.O., S. 26 ff.

Entscheidungsregel für die betrieblichen Investitionsplanungen verwenden[28].

Die lineare Programmierung kann deswegen die neoklassische Produktionstheorie nicht ersetzen; sie kann - wie angedeutet wurde - nur einen Teil deren Probleme besser und (wenn man so werten will) realistischer lösen, weil sie weniger allgemein ansetzt. Sie kann das nur solange, als sich eindeutig Prozesse (oder Aktivitäten) definieren lassen, für diese die Konstanz der technischen Koeffizienten gilt und effektive Beschränkungen vorhanden sind. Für die nicht-linearen oder nicht annähernd linearisierbaren Probleme und für Probleme ohne eingrenzende Schranken bleibt der Marginalanalyse Anwendungsraum.

2.113 Betriebswirtschaftliche Voraussetzungen für den Linearen Planungsansatz

Was bedeutet nun der lineare Planungsansatz betriebswirtschaftlich, welche Voraussetzungen müssen für ihn erfüllt sein?

1. Es muß eine Wahl zwischen mehreren Aktivitäten, zwischen mehreren Möglichkeiten des Vorgehens bestehen, und es müssen mehrere Aktivitäten (Prozesse) simultan durchführbar sein.

   Wenn beispielsweise aufgrund langfristiger Lieferverträge die zu produzierenden Stückzahlen festliegen, und wenn für die Herstellung der Güter jeweils nur ein technisch vorgegebenes Verfahren möglich ist, so erübrigt sich ein exakter Planungsansatz, denn es verbleibt keine Wahl mehr. Man kann nur noch durch organisatorische und technisch-rationalisierende Maßnahmen, nicht aber mehr durch Planung, d.h. durch Abwägung der Einflußgrößen und Entscheidung für ein bestimmtes Vorgehen zeitlich, technisch und mengenmäßig das Ziel zu erreichen versuchen

---

28) vgl. H. Albach: "Lineare Programmierung als Hilfsmittel betrieblicher Investitionsplanung", Zeitschr.f. handelswiss. Forsch., N F 12.Jg.(1960), S.526-549; J.L. Fisher:"A Class of Stochastic Investment Problems", Operations Research, Vol. 9 (1961), pp.

(z.B. die Kosten zu minimieren).

2. Es müssen Beschränkungen und Begrenzungen vorhanden sein, die das Ziel nicht ohne weiteres erreichen lassen und Ursache dafür sind, daß die Entscheidung für ein Aktivitätsniveau die verbleibenden Wahlmöglichkeiten für die anderen Aktivitäten vermindert und präjudiziert. Solche Begrenzungen werden in der Regel, zumindest kurzfristig, vorhanden sein, man denke an Kapazität, Arbeitskräfte, Raum, Kapital, Absatz, Material u.ä., so daß diese Voraussetzung meist erfüllt sein wird[29].

3. Es muß ein klares Ziel erkannt und angestrebt sein (z.B. Kostenminimierung, Zeitminimierung, gleichmäßige Beschäftigung u.ä.)[30].

4. Das Ziel und die Begrenzungen müssen zahlenmäßig erfaßbar und interdependent sein. Ein exakter Planungsansatz erfordert also, daß auch eventuell relevante qualitative Größen, wie beispielsweise Kreditwürdigkeit, Bewertung von Tätigkeiten, öffentliche Meinung u.ä., irgendwie (z.B. durch eine Rangskala) quantifiziert werden.

Diese vier Voraussetzungen gelten im Grunde für jeden quantitativen Planungsansatz mit Zuordnungscharakter. Für den linearen Planungsansatz gilt noch als fünfte Voraussetzung:

---

28) Forts. 53-65 und R.B. Fetter: "A Linear Programming Model for Long Range Capacity Planning", Management Science, Vol. 7 (1961), pp. 372-378

29) O. von Mering: ("Linear Programming mit besonderer Berücksichtigung der Simplexmethode", Ordo-Jahrbuch, Bd. IX, 1957, S. 231-247) bestätigt die Bedeutung unserer 1. und 2. Voraussetzung: "In dem Maße, wie fixes Kapital gegenüber dem umlaufenden Kapital an Bedeutung gewinnt, wird das Marginalprinzip unrealistisch" (S. 246). Nur die Unterscheidung einer Anzahl möglicher Produktionsprozesse sei für die Industrie sinnvoll. Aus dem gleichen Grunde sei auch gegeben, daß die Betriebe ständig einschränkenden Bedingungen unterworfen sind.

30) Grundsätzlich ist es auch möglich, Kombinationen von Unter-Zielen als Ziel zu bestimmen, deren Kompatibilität muß aber gewahrt sein. Vgl. hierzu: C.N. Klahr: "Multiple Objectives in Mathematical Programming", Operations Research, Vol. 6 (1958), pp.

5. Die aus diesen Zahlen aufstellbaren Gleichungen müssen den mathematischen Anforderungen des Linear Programming genügen. Das bedeutet:

   Die technischen Koeffizienten a_{ij}, die Beschränkungen b_j und die Zielkoeffizienten c_i müssen konstant sein, also mengenunabhängig, d.h. "alle Einsätze und Erträge müssen proportional zum Aktivitätsniveau und die Koeffizienten unabhängig davon sein, welche anderen Aktivitäten stattfinden und auf welchem Niveau das geschieht"[31].

Die Probleme der praktischen Anwendung werden bei der vierten und fünften Voraussetzung, also bei der zahlenmäßigen Erfaßbarkeit und bei der Konstanz der Koeffizienten liegen. Sie sind Tatfragen; auch die an der industriellen Anwendung des Linear Programming interessierte Literatur, wie Vaszonyi[32] und Ferguson-Sargent[33], impliziert daher diese Voraussetzungen und diskutiert sie nicht. Um die Grenzen in der Anwendung des Linearen Planungsansatzes abzustecken, sei hierzu allgemein ausgeführt:

Die technischen Koeffizienten a_{ij} und die Kapazitäten b_j sind im allgemeinen am ehesten meßbar; denn das sind meist in einer natürlichen Maßzahl (wie Minuten, kg, m, u.ä.) zu messende Größen, die sich bei gleichbleibender Technik auch nur selten verändern. Diese technischen Input-Daten sind im Industriebetrieb sowieso oft vorhanden und werden auch laufend kontrolliert und berichtigt, weil auf ihnen normalerweise die Akkordlohnbemessung basiert. Auch die Trennung des variablen Anteils von einem fixen Anteil (für Maschinenarbeit z.B. Stückzeit und Rüstzeit) liegt im allgemeinen

---

30) Forts. 849-855. Grundlegende Erörterungen zur Bildung der Zielfunktion findet man bei R. Dorfman: "Operations Research", The American Economic Review, Vol. L (1960), pp. 575-623, besonders pp. 607

31) M. Beckmann: Lineare Planungsrechnung, a.a.O., S. 24

32) A. Vaszonyi: Scientific Programming ..., a.a.O.,

33) R.O. Ferguson and L.F. Sargent: Linear Programming, Fundamentals and Applications, New York, Toronto, London 1958

vor, so daß ein linearer Planungsansatz verwendet werden kann, sofern der variable Teil der technischen Koeffizienten mengenunabhängig ist, also der technische Input linear-proportional mit der Output-Menge wächst. Das wird häufig der Fall sein, weil es in der Technik nur selten degressive oder progressive Faktoreinsätze gibt, zumindest in den für die Planung relevanten Mengenbereichen. Bei kleinen oder relativ für den Betrieb sehr großen Mengen sind nichtlineare Faktoreinsätze eher möglich, man denke z. B. an Materialverschnitte, die oft erst von gewissen Mengen ab konstant sind, oder an zusätzliche Kosten, die durch die unvermeidlichen Zeit- und Reibungsverluste entstehen, wenn nahe der Kapazitätsgrenze produziert wird. Diese Grenzen sind aber nicht der Regelfall, oder die Nicht-Linearitäten des Faktoreinsatzes sind geringfügig und vernachlässigbar, so daß weder an der mangelnden Identifizierbarkeit noch an der fehlenden Konstanz der technischen Koeffizienten ein linearer Planungsansatz zunächst scheitern wird.

Anders ist das mit den Zielkoeffizienten. Diese werden meist in Geldgrößen gemessen, und es treten bei ihnen Zurechnungsfragen auf, die u. U. Ermessensentscheidungen erfordern. Insbesondere bei der Ermittlung von Kostenzahlen und bei der Trennung in fixe und variable Kosten können die Ungenauigkeiten so groß werden, daß diese Daten nicht mehr als zuverlässige Basis für einen exakten Planungsansatz geeignet sind. Die Trennung der variablen von den fixen Kosten ist aber notwendig, weil im linearen Planungsansatz nur mit den variablen Kosten gerechnet werden kann, und zwar nur, sofern sie linear-proportional mit den Ausbringungsmengen steigen, die Stückkosten also konstant, d. h. mengenunabhängig sind, wie sich aus der fünften Voraussetzung ergibt. Nur mit dem variablen Teil der Kosten zu rechnen, ist auch ziellogisch. Denn in einem Planungsansatz für einen Mehrproduktenbetrieb geht es stets darum, im Rahmen der gegebenen Kapazitäten, also im Rahmen der gegebenen, nicht mehr vermeidbaren fixen Kosten, so zu planen, daß

für alle Produkte insgesamt das Optimum erreicht wird; und das kann nur an Hand der Kosten geschehen, die unmittelbar mit den Ausbringungen der einzelnen Produkte zusammenhängen, also mit Hilfe der einzelnen variablen Kosten. Die fixen Kosten entstehen insgesamt, unabhängig von der Höhe der Produktion und der Belastung einer bestimmten Kapazität durch die verschiedenen Produkte; sie scheiden als Planungskriterium also aus. "Die Kostenermittlung kann sich nicht auf eine Gesamtfunktion, die ex ante auf einem nicht gegebenen unmittelbaren Zusammenhang zwischen Ausbringung und Verbrauch an Faktoren-Einsatzmengen basiert, stützen, sondern muß die Vielzahl der durch die einzelnen Betriebsmittel gegebenen individuellen Kostenfunktionen in Betracht ziehen"[34].

Ein Rechnungswesen nach dem Prinzip des Schmalenbachschen Kontenrahmens liefert diese Trennung nach fixen und variablen Kosten zunächst nicht, weil es sein Hauptgewicht auf eine genaue Kostenabrechnung und -kontrolle und eine genaue Zurechnung auf Kostenstellen und Kostenarten legt und im wesentlichen vergangenheitsorientiert ist. Die Plankostenrechnungssysteme führen dagegen im allgemeinen die Teilung in fixe und variable Kosten durch und sind somit als Zahlenbasis für einen linearen Planungsansatz besser geeignet[35]. Im Einzelfall ist die Ermittlung der variablen Kosten oft recht schwierig, weil ein Teil der Produktionskosten nicht mengenproportional ist, die variablen Kosten also keine lineare Funktion darstellen. Beispielsweise sind die nicht-fixen Kosten eines Glühofens, etwa für Energie, nicht ohne weiteres mengenproportionale Kosten, denn sie entstehen bei jeder Füllung des Ofens, gleichgültig ob er mit vielen oder wenigen Stücken beschickt wird.

---

34) H. Poller: Kostenrechnung bei konkurrierender Produktion, Dissertation Freiburg 1957, S. 44

35) vgl. G. Burgermeister und K. Müller: "Die Kostenrechnung als Führungsmittel, Konzeption einer Plan- und Standardkostenrechnung", Unternehmensforschung, Bd. 4 (1960), S. 22-28. vgl. hierzu auch S. 64 ff.

Immerhin werden oft Näherungen möglich sein, so daß eine lineare Planungsrechnung angesetzt werden kann. Sie sind umso mehr vertretbar, wenn die Kosten nur für gewisse Bereiche der Ausbringungen in fixe und variable differenziert werden müssen. Diese Bereiche werden im allgemeinen nach unten hin durch Mindestabsatzzahlen, nach oben hin durch die Kapazitätsgrenzen abgesteckt, und nur innerhalb dieser Grenzen soll durch Planung ein Optimum erreicht werden. Eine weitere Erleichterung kann sich auch dadurch ergeben, daß es bei Planungsrechnungen nicht unbedingt auf eine absolute Genauigkeit der Faktoren ankommt. Ziel ist ja nicht eine exakte Kostenkontrolle und -abrechnung. Es reicht vielmehr die Richtigkeit in den Relationen der Zahlen, und diese läßt sich, wenn man schon annähern muß, oft besser beurteilen als deren absolute Richtigkeit.

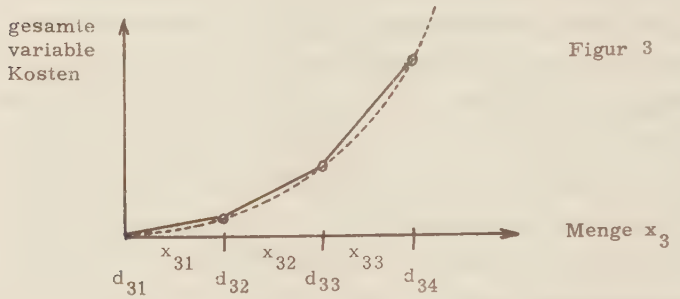
2.114 Linearisierter konvexer Planungsansatz

Eine einfache Linearisierung ist in den Fällen nicht vertretbar, wo die das Ziel bestimmende Funktion eindeutig mengenabhängig ist. Sofern die Funktion konvex ist, z.B. entsprechend Figur 3, d.h. sofern die Kurve stetig steigt (bzw. fällt) und keine Wendepunkte hat, so daß jede Verbindungslinie zwischen zwei Punkten innerhalb der durch die Kurve eingehüllten Fläche liegt, kann ein "konvexer Planungsansatz" aufgestellt werden. Auch eine solche Aufgabe, bei der die Beschränkungen und die (technischen) Produktionskoeffizienten konstant sind und nur die Zielfunktion mengenabhängig ist, läßt sich unter den weiter unten genannten Voraussetzungen formal-mathematisch lösen. Da der Rechenaufwand hierfür aber sehr groß werden kann, ist es im Anwendungsfall ratsam, die Nicht-Linearität der Zielfunktion durch stückweises Linearisieren anzunähern und somit wieder einen einfachen linearen Planungsansatz zu erzeugen[36].

---

36) So auch: A. Vaszonyi: Scientific Programming ..., a.a.O., pp. 194-218

Ist beispielsweise eine steigende Kostenkurve über das Niveau einer Aktivität gegeben (vgl. Figur 3), so spaltet man diese.



Figur 3

Man teilt also die Aktivität (in Figur 3 ist das Aktivität Nr. 3) auf in mehrere Aktivitäten, die eingegrenzt werden durch die Abszissen der Schnittpunkte der Geraden (Punkte d_{31}-d_{32}, d_{32}-d_{33}, d_{33}-d_{34}). Für die einzelnen (Unter-)Aktivitäten nimmt man somit angenähert Konstanz der Stückkosten an. Die Feinheit der Aufteilung hängt dabei von der Krümmung der Funktion und der zulässigen Abweichung der Geraden von den durch sie angenäherten Kurvenstücken ab.

Im linearen Fall hätte als Nebenbedingung für das Niveau der Aktivität 3 gegolten

$$0 \leq x_3 \leq d_3 \tag{4}$$

Jetzt gelten als Beschränkungen für die (Unter-)Aktivitäten der Aktivität 3:

$$\begin{aligned} 0 \leq x_{31} &\leq d_{32} - d_{31} \\ 0 \leq x_{32} &\leq d_{33} - d_{32} \\ 0 \leq x_{33} &\leq d_{34} - d_{33} \end{aligned} \tag{5}$$

Im linearen Fall hieße z.B. die Kostenfunktion:

$$f_3(x_3) = c_3 x_3 \tag{6}$$

Im konvexen Fall heißt die Kostenfunktion allgemein:

$$f_3(x_3) = c_3(x_3)\, x_3 \tag{7}$$

Die durch den Polygonzug linearisierte Kostenfunktion heißt dann:

$$(8) \qquad f_3(x_3) = c_{31} x_{31} + c_{32} x_{32} + c_{33} x_{33}$$

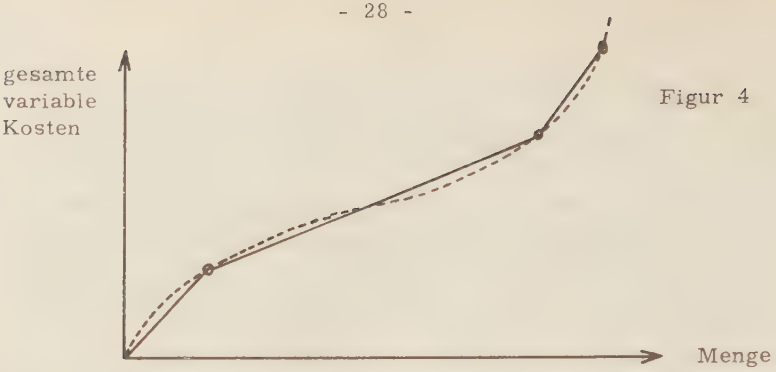
Auf den ersten Blick könnte dieser Kunstgriff der Unterteilung in mehrere Aktivitäten durch die stückweise Linearisierung der Schlüssel zur Lösung einer ganzen Reihe von Problemen sein, bei denen man es mit nicht-linearen Zielfunktionen zu tun hat.

Drei wesentliche Voraussetzungen müssen aber für einen konvexen und ebenso linearisierten konvexen Planungsansatz erfüllt sein:

1. Die für das Ziel relevante Mengenfunktion muß, wie schon dargelegt, konvex sein, d.h. sie muß stetig steigen bzw. fallen.

2. Es muß die für das Ziel relevante Mengenfunktion konvex in der "richtigen" Richtung sein[37]. D.h. die Funktion muß in der Weise konvex sein, daß die Rechnung zuerst die ersten Mengen auswählt. Hat man Kostenminimierung als Ziel, so ist ein sinnvoller konvexer Planungsansatz nur möglich, wenn die Kostenfunktion wie in Abbildung 3 gekrümmt ist, also die variablen Kosten mit zunehmenden Mengen steigen. Für die Gewinnmaximierung als Ziel müssen entsprechend die Stückgewinne mit zunehmenden Mengen fallen.

   Hat man eine Kostenkurve mit Wendepunkt, etwa in der Form eines liegenden S, vgl. Figur 4, so würde also eine konvexe Planungsrechnung zu einem unsinnigen Ergebnis führen; denn sie würde zuerst die Mengen auswählen, deren Anstiegskoeffizienten (variable Kosten) am geringsten wären, und das sind bei einer Kurve gemäß Figur 4 die mittleren Mengen, nicht aber die Anfangsmengen; ohne die Anfangsmengen sind aber die höheren Mengen nicht denkbar. Nur wenn Mindestmengen in der Höhe vorgegeben sind, daß ein Planungsansatz nur für den konvexen Bereich einer Funktion mit Wendepunkten angesetzt werden kann, kann ein sinnvoles Ergebnis erwartet werden.



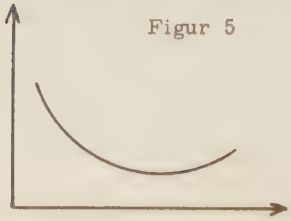
Figur 4

3. Die Nebenbedingungen müssen, wie im einfachen linearen Fall, mengenunabhängig sein; d.h. also, die technischen Koeffizienten a_{ij} und die Beschränkungen b_j müssen konstant sein.

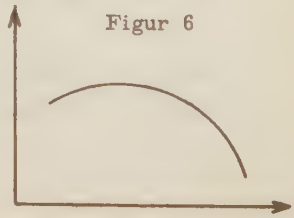
2.115 Linearer und linearisierter konvexer Planungsansatz und das Ertragsgesetz

Die erste und dritte soeben genannte Voraussetzung (Konvexität der Zielfunktion und Konstanz der technischen Koeffizienten) ist eine Tatfrage; sie dürfte in einer Reihe von Fällen gegeben sein. Die zweite Voraussetzung (Konvexität in der "richtigen" Richtung) ist dagegen von grundsätzlicher Bedeutung. Sie ist nur dann erfüllt, wenn für den zu berechnenden Sachverhalt das Ertragsgesetz, das Gesetz von dem mit steigenden Mengen fallenden Ertragszuwachs (oder analog ausgedrückt[38]: steigenden Kostenzuwachs) gilt. Neuerdings wird die allgemeine Gültigkeit des Ertrags-

37) In der Literatur, auch in der Mathematischen, gibt es keine eindeutige Definition der Begriffe "konvex" und "konkav". Mangoldt-Knopp (Einführung in die höhere Mathematik, Bd. 2, II. Aufl., 1958, S. 96) bezeichnen die stetig gekrümmten Funktionen vom Ursprung aus gesehen; eine Kurve gemäß Figur 5 ist dann konvex von unten, eine Kurve gemäß Figur 6 konkav von unten. T.L. Saaty (Mathematical Methods of Operations



Figur 5



Figur 6

gesetzes im Bereich der Industrie bestritten[39]. Soweit man statt steigenden Grenzkosten konstante Grenzkosten unterstellt, ist diese Problematik für einen exakten Planungsansatz ohne Bedeutung; im Gegenteil: muß man bei steigenden Grenzkosten eine (linearisierte), konvexe Planungsaufgabe (wie oben) formulieren, so kann man - wie schon gezeigt wurde - bei konstanten Grenzkosten den im Verfahren einfacheren linearen Planungsansatz verwenden. Vereitelt wird ein exakter Planungsansatz erst bei fallenden Grenzkosten; zwar gilt dann grundsätzlich das einfache Prinzip: Soviel wie möglich produzieren; aber das Zuordnungsproblem der Aktivitäten auf die Kapazitäten bleibt dennoch bestehen, weil wegen der Kapazitätsgrenzen die Produktkombinationen ausgesucht werden müssen, die zum maximalen Gesamtertrag führen, und das kann ohne spezielle Annahmen mit den Mitteln des linearisierten konvexen Planens nicht gelöst werden.

Zu überlegen ist, ob nicht dieser Fall sinkender Grenzkosten für den linearisierten Planungsansatz irreal ist. Für den einfachen linearen Planungsansatz wird das Ertragsgesetz geleugnet; denn

---

37) Forts.: Research, New York, Toronto, London 1959, pp.130/131) bezeichnet kurz Kurven gemäß Figur 5 konvex und solche gemäß Figur 6 konkav. Vaszonyi (a.a.O., p.199) nennt dagegen die Kurven "Konvex von oben" (Figur 5) und "konvex von unten" (Figur 6). Da es uns hier um die ökonomische Bedeutung und Anwendung des speziellen nicht-linearen Planungsansatzes geht, haben wir nicht formal in konvexes und konkaves Planen getrennt, sondern nur den Begriff des konvexen Planens und als Kriterium für die Anwendbarkeit den pragmatischen der "richtigen" Richtung verwandt.

38) vgl. H. v. Stackelberg: Grundlagen der theoretischen Volkswirtschaftslehre, 2. Aufl., Bern/Tübingen, 1951, S. 54/55

39) vgl. auch S. 18. Die Diskussion wurde ausgelöst durch Piero Sraffa: "The Laws of Returns under Competitive Conditions", Economic Journal, Vol. 36 (1926), pp. 535-550. Gutenberg (a.a.O., Kapitel 3) und H. Koch ("Untersuchungen über den Gültigkeitsbereich des Gesetzes vom abnehmenden Ertragszuwachs", Z f ges St wiss, Bd. 106 (1950); S. 309-323), erörtern das Problem theoretisch; M. Ezekiel und K-H. Wylie: The Cost Curve

man geht von gegebenen Prozessen und von konstanten Produktionskoeffizienten aus, die durch die Niveaus der Aktivitäten nicht beeinflußt werden. Man postuliert also weder ein Gesetz von der abnehmenden Rate der Substitution, noch ein Gesetz abnehmender Grenzerträge (zunehmender Grenzkosten), wie es in der traditionellen Produktionstheorie, soweit man Substitution und nicht-konstante Produktionskoeffizienten unterstellt, getan wird; man rechnet vielmehr mit konstanten Grenzkosten. Wenn nun nahe der Kapazitätsgrenzen produziert wird, so können sich nach aller Erfahrung höchstens, wenn die Grenzkosten schon nicht konstant bleiben, steigende Grenzkosten, nicht aber fallende ergeben. Warum können sich steigende Grenzkosten ergeben? Hier gilt es jetzt, mit den Begriffen sauber zu verfahren. Einmal, weil es möglich ist, daß bei den hohen Mengen die technischen Koeffizienten nicht konstant bleiben (z.B. durch Reibungsverluste beim Durchlauf und Arbeitsfluß)[4o]. Dieser Fall ist der eigentliche Inhalt des Ertragsgesetzes. Wir haben ihn oben beim linearisierten konvexen Planungsansatz nicht behandelt. Das Modell könnte aber ohne weiteres dahingehend verändert werden, daß stückweise linearisierte technische Koeffizienten unterstellt und entsprechende neue Prozesse definiert werden, für die dann wieder die Konstanz der zugehörigen variablen

---

39) Forts.: for Steel Production, Journal of Political Economy, Bd. 18 (1940), pp. 777-821 (zitiert nach Gutenberg a.a.O., S. 280); G. Kühn: Die Konzernbildung in der Zementindustrie, Berlin 1929, und: V. Seifried: "Möglichkeiten und Grenzen der Kostenplanung bei Eisenbahnwerkstätten", Zeitschr. f. Betriebswirtschaft, 24. Jg. (1954), S. 151-167, geben empirische Belege dafür, daß die Grenzkosten in den untersuchten Industrien und Zeiträumen mit steigender Produktion nicht steigen, sondern konstant sind bzw. sogar fallen. Vgl. auch W. Kilger: Produktions- und Kostentheorie, Wiesbaden 1958, S. 115-128 und H. v. Natzmer: "Traditionelle und moderne Kostenkurven", Zeitschr. f. Nationalökonomie, Bd. XXI (1961), S. 37-97, besonders S. 66.

4o) So zeigen die Untersuchungen des Ifo-Instituts, München (aus dem Forschungsvorhaben "Langfristige Projektion": A. F. Mester, "Zur Ausnutzung des deutschen Sachkapitals, Zeitreihen von 1925 bis 1938 und 1950 bis 1957", Vervielfältigung V/2/f, 1960), daß selbst in Vollbeschäftigungsjahren die industriellen Anlagen

Kosten gelten würde. Zum anderen können sich steigende Grenzkosten ergeben (und diesen Fall haben wir oben erörtert), weil bei den höheren Mengen zwar der technische Input der gleiche bleibt, die Preise (Kosten) der Inputfaktoren aber steigen (beispielsweise durch Überstundenzuschläge, Anwerbungskosten, Abwerbungsprämien bzw. entsprechende Lohnerhöhungen, Mietkosten für zusätzliche Maschinen, Verwendung von Trinkwasser statt Brauchwasser, Blindstromzuschläge u.ä.). Dieser Fall fällt im strengen Sinne[41] nicht mehr unter das Ertragsgesetz, denn sonst läßt man als ertragszuwachsmindernde Gründe auch Marktsituationen, Wettbewerbsverhältnisse und allgemein systembedingte Gegebenheiten zu. Für einen bestehenden Betrieb bilden aber gerade diese nicht nur kurzfristig gegebenen Tatsachen ein Datum. Sie sind für das betriebsindividuelle Zustandekommen abnehmenden Grenzertrages wohl der hauptsächliche Bestimmungsgrund; die technischen Koeffizienten bleiben im Planungsbereich viel eher konstant. Da es hier darum geht, bestehende Betriebe und die Gegebenheiten ihrer Kapazität, ihres Einkaufsmarktes und ihres Verkaufsmarktes zu betrachten, wollen wir diesen zweiten Fall, daß die Faktorpreise bei hoher Kapazitätsauslastung steigen, auch unter den Begriff des Ertragsgesetzes subsumieren; denn die ökonomischen Folgen sind ja die gleichen, gleichgültig ob steigende Produktionskoeffizienten und konstante Faktorpreise oder konstante Produktionskoeffizienten und steigende Faktorpreise oder steigende

---

40) Forts.: nicht voll ausgenutzt werden. Man vermutet dort, daß die Betriebe sich so verhalten, weil sie sich eine gewisse Produktionselastizität zu erhalten bestrebt sind oder weil sie bei noch höherer Ausnutzung in den Bereich abenehmender Grenzerträge kommen würden. Da es sich dort um Zahlen der industriellen Anlagen insgesamt handelt, muß man diesen Schluß unter dem Vorbehalt betrachten, daß in einzelnen Industriebereichen und Betrieben sehr wohl die Anlagen bis zu 100% ausgenutzt werden bzw. werden können. Der Fall der Produktion an der Kapazitätsgrenze bleibt für uns hier also relevant.

41) wie etwa bei H. v. Stackelberg, Grundlagen der ..., a.a.O., II. Teil.

Produktionskoeffizienten und steigende Faktorpreise betrachtet werden.

Sind nun auch fallende Produktionskoeffizienten denkbar? Offenbar nicht, wenn man nur den produktionswirtschaftlichen Aspekt und somit die Fertigung an Kapazitätsgrenzen im Auge hat. Die Formulierung des linearen bzw. linearisierten Planungsansatzes ist aber allgemeiner Natur; es wird, ganz allgemein, ein Extremum einer linearen Zielfunktion unter linearen Nebenbedingungen gesucht. Diese Nebenbedingungen müssen nicht unbedingt Kapazitätsschranken sein. Als Nebenbedingungen können auch Absatzbeschränkungen, d.h. Beschränkungen bei den Aktivitäten selbst auftreten, oder Kapitalbeschränkungen und Lagerraumbegrenzungen und ähnliche auch durch zusätzliche Kosten nicht kurzfristig erweiterbare Beschränkungen in Frage kommen. Dann ist es möglich, daß man die (technischen) Kapazitätsgrenzen nicht erreicht und sich noch im Bereich fallender Grenzkosten bzw. steigender Grenzerträge befinden kann. Bei den Zielkoeffizienten muß es sich nämlich nicht immer nur um (Produktions-)Kostengrößen handeln, sondern diese können - und wenn auch nur teilweise - (Markt-)Preise sein, für deren Mengenabhängigkeit selbstverständlich der Verlauf des Ertragsgesetzes nicht gelten muß (und bei Beschaffungspreisen im allgemeinen auch nicht gelten wird). Auch in diesen Fällen entsteht das Zuordnungsproblem der Aktivitäten auf die Produktions- oder Markt-Kapazitäten. Die Möglichkeit sinkender Grenzkosten zu berücksichtigen und damit die grundsätzlichen Grenzen auch des (linearisierten) konvexen Planungsansatzes abzustecken, ist also nicht irreal. Bei Überlegungen zur Planung von Eigenfertigung und Fremdbezug werden wir diesem Hindernis noch begegnen.

2.12 Produktionsglättung (zeitlicher Produktionsausgleich)

Zu den Planungsproblemen mit Zuordnungscharakter wird in fast jedem Industriebetrieb das Problem der Produktionsglättung, des zeitlichen Ausgleichs der Produktionsmengen zur Stabilisierung des Produktionsniveaus gehören. Denn vielfach wird als primäres Betriebsziel gelten: Die laut Absatzplan zu fertigenden Produkte sollen zu geringsten Kosten produziert werden. Diese werden gewöhnlich dann erreicht, wenn die Kapazitäten gleichmäßig ausgelastet werden, d.h. wenn Produktionsart und -verfahren und -niveau in der Planungsperiode so wenig wie möglich geändert werden.[42] Aus zwei Gründen wird eine Produktionsglättung oft vonnöten sein: Einmal, weil bei der Mehrproduktenproduktion die Zusammensetzung der Aufträge schwanken kann, so daß sich in bestimmten Fertigungsabteilungen Belastungsspitzen kumulieren können, die über die vorhandene Kapazität gehen; zum anderen, weil der Absatz saisonalen Schwankungen unterliegen kann, so daß insgesamt in den Betrieb dadurch Ungleichheiten eindringen können. - Formal das gleiche Problem besteht auch, wenn die Möglichkeiten zum Rohstoffbezug (und entsprechend deren Preise) saisonal schwanken.

Betrachten wir, der leichteren Anschaulichkeit wegen, das Problem als Ausgleich saisonaler Schwankungen im Absatz. Welche Größen sind hierbei abzuwägen? Verfährt man nach dem "Ausgleichsprinzip"[43], d.h. produziert man in der ganzen Periode zu jedem Zeitpunkt die gleiche Menge ohne Rücksicht auf die Absatzkurve[44], so entstehen die Produktionskosten und, wegen des Mengenausgleichs, Fertiglagerkosten. Verfährt man nach einem Stufenprinzip,

---

42) Grundsätzliche Bemerkungen zu diesem Problem findet man bei: Th. Beste: "Die Produktionsplanung", Zeitschr. f. handelswiss. Forschung, Bd. 32 (1938), S. 345-371

43) K. Mellerowicz: Allgemeine ..., a.a.O., Bd. 3, S. 101

44) Das setzt die Lagerfähigkeit der Güter natürlich voraus.

d.h. produziert man, indem man sich dem Verlauf der Absatzkurve stufenförmig anpaßt, während einzelner Unterperioden gleichmäßig, so sind zusätzlich zu den Produktionskosten Produktionsänderungskosten zu berücksichtigen, die einmalig durch den Wechsel von einem Produktionsniveau auf ein anderes entstehen und nicht zu den Produktionskosten der beiden Niveaus gehören. Eine dritte Möglichkeit ist das "Gleichlaufprinzip"[43], bei dem die Produktion voll zu jedem Zeitpunkt dem Absatz angepaßt wird, wo also nur die Produktionskosten und die Produktionskosten und die Produktionsänderungskosten eine Rolle spielen, Fertiglager und entsprechende Kosten theoretisch aber nicht auftreten.

2.121 Modell einer Produktionsglättung für ein Gut

Analytisch läßt sich das "Stufenprinzip" (das als Spezialfall das Ausgleichs- und das Gleichlaufprinzip enthält) in folgender Weise beschreiben.

Zunächst sei der Produktionsausgleich nur für ein Gut betrachtet.

Die Gesamtproduktion P der Planungsperiode (z.B. ein Jahr) wird auf die Unterperioden (z.B. Monate) aufgeteilt

$$(9) \qquad P = p_1 + p_2 + \ldots + p_s + \ldots + p_n$$

Der Gesamtabsatz A der Planungsperiode ist entsprechend der gegebenen Absatzkurve auf die Unterperioden verteilt:

$$(10) \qquad A = a_1 + a_2 + \ldots + a_s + \ldots + a_n$$

Dabei wird für die Spanne der Unterperioden Konstanz der Produktionskurve und der Absatzkurve unterstellt (Stufenprinzip). Wählt man die Unterperioden sehr klein, dann geht diese diskrete abschnittsweise Betrachtung in eine kontinuierliche über.

Die einzelnen a_s sind wegen der Absatzschwankungen im allgemeinen nicht gleich den möglichst auf gleicher Höhe zu haltenden p_s. Bei $a_s < p_s$ wird die Differenz auf Lager prodziert; bei $a_s > p_s$ wird sie dem Lager entnommen. Dabei muß aber folgende Gleichgewichtsbedingung erfüllt sein: Die kumulierte Produktion bis zu jedem Zeitpunkt t muß mindestens gleich sein dem kumulierten Absatz bis zum Zeitpunkt t; das bedeutet bei diskreten T-Werten:

$$(11) \qquad \sum_{t=1}^{t} p_t \geq \sum_{t=1}^{t} a_t \qquad (t = 1 \ldots T).$$

Will man am Ende der Gesamtperiode kein zusätzliches Lager übrig behalten, so muß gelten:

$$(12) \qquad P = \sum_{s=1}^{n} p_s = A = \sum_{s=1}^{n} a_s$$

Für die kurzfristige Ausgleichsplanung ist davon auszugehen, daß die Produktionskapazität gegeben und beschränkt ist. Diese Kapazitätsbeschränkung braucht aber nicht für jede Unterperiode gleich zu sein (in der Urlaubszeit beispielsweise kann die Kapazität sinken). Für diesen allgemeinen Fall ergibt sich also für jede Unterperiode als Bedingung, daß die Produktion der Periode s höchstens gleich der vorhandenen Kapazität K_s in dieser Periode sein kann, wenn k der Kapazitätsbedarf je Stück ist:

$$(13) \qquad k \cdot p_s \leq K_s \qquad (s=1 \ldots n)$$

In gleicher Weise können auch Beschränkungen des Lagerraums L von Bedeutung sein; er dürfe für die Unterperioden gleich sein, so daß für jeden Zeitpunkt t gelten muß:

$$(14) \qquad bl_t \leq L$$

wobei l_t die Differenz zwischen Produktion und Absatz bis zum Zeitpunkt t ist

$$(15) \qquad \sum_{t=1}^{t} p_t - \sum_{t=1}^{t} a_t = l_t \qquad (\text{vgl. } (11))$$

und b der Raumbedarf je Stück.

Wie sind die für die Produktionsglättung relevanten Kosten, die ja insgesamt minimiert werden sollen, in das skizzierte Modell mit den Bedingungen (10) bis (15) einzubauen? Welche Kosten und Art von Kostenfunktionen man vor allem betrachtet, ist eine Frage des speziell zu lösenden Falles. Hier soll von einigen Möglichkeiten der Kosten und ihrer Charakteristika ausgegangen werden, die nach Gesichtspunkten der Plausibilität und der Einfachheit ausgewählt wurden. Theoretische Erörterungen darüber, welche Kostenfunktionen in ein Glättungsmodell einzuführen sind, findet man z.B. bei Modigliani-Hohn[45], Schneider-Jessen[46] und Karush-Vaszonyi[47]; sie stimmen mit den Überlegungen hier im Prinzip überein.

Zunächst sind in eine derartige Planung die Produktionskosten einzubeziehen. Als Planungskriterium sind dabei nur die variablen Produktionskosten von Bedeutung, die fixen Kosten der Produktion, die unabhängig davon entstehen, ob und wieviel produziert wird, können als Konstante vernachlässigt werden. Im einfachsten Fall können die variablen Stückkosten konstant, d.h. mengenunabhängig sein. Ist der für die Planung relevante Mengenbereich relativ groß, so muß u.U. mit der Möglichkeit steigender Stückkosten bei höheren Mengen gerechnet werden. Wie S. 25 f. gezeigt wurde, führt dieser Fall wegen der Bildung von Unter-Aktivitäten nur zu einer zahlenmäßigen Erweiterung. Auf diese soll hier verzichtet werden; es sei also der einfache Fall konstanter variabler Stückkosten unterstellt. In diesem Falle bilden die Produktionskosten kein Planungskriterium für die Produktionsglättung. Sie können hier also weggelassen werden.

---

45) F. Modigliani und F.E. Hohn: "Production Planning over Time and the Nature of the Expectation and Planning Horizon", Econometrica, Vol. 23 (1955), pp. 46-66

46) E. Schneider und B. Jessen: "Absatz, Produktion und Lagerhaltung bei einfacher Produktion", Archiv für mathematische Wirtschafts- und Sozialforschung, Bd. IV, 1938, pp. 99-120

Als zweite Kostenart in einem Glättungsmodell kommen die Lagerkosten (insbesondere der Zins) in Betracht. Diese sind zeitabhängig, sie müssen also für die einzelne Unterperiode s definiert werden. Innerhalb der Unterperioden werden die Lagerkosten je Stück in erster Näherung als konstant angenommen werden können, d.h. die Gesamt-Lagerkosten steigen proportional mit den Lagermengen. Das gilt natürlich nicht für fixe Bestandteile wie Raumkosten; diese können aber aus der Planung eleminiert werden. Falls auch die Lagerkosten im Einzelfall mit Sprüngen steigen, so müssen auch für sie Unter-Aktivitäten definiert werden.

Als dritte Kostenart sind dagegen abzuwägen die Kosten der Produktionsänderung selbst, die ausschließlich und einmalig durch den Wechsel von einem Produktionsniveau auf ein anderes entstehen und nur mit dem Vorgang des Wechsels, nicht aber mit den Produktionskosten eines der beiden Niveaus zusammenhängen (also auch nichts mit den skizzierten Sprungkosten zu tun haben). Natürlich würden sich diese Umstellungskosten auch den Produktionskosten zurechnen lassen. Dann würde man diese aber ihrer Unabhängigkeit von der Zeit und der Häufigkeit der Niveauänderungen und damit ihrer plausiblen (evtl. stückweisen) Linearität berauben und den Planungsansatz unnötig komplizieren. Denn für diese reinen Umstellungskosten kann annähernd eine Proportionalität zu der Höhe der Produktionsausdehnung bzw. -einschränkung bestehen.

Die zu minimierende Gesamtkostenfunktion C einer Unterperiode s lautet dann:

$$C_s = d \sum_{s=1}^{s} (p_s - a_s) + u\,(p_s - p_{s-1}) \qquad (16)$$

Lagerkosten — Produktionsänderungskosten

wobei:

d = variable Lagerkosten je Produktionseinheit und Unterperiode

47) W. Karush and A. Vaszonyi: "Mathematical Programming and Service Scheduling", Management Science, Vol. 3 (1957), pp. 140-148

u = Produktionsänderungskosten je Produktionseinheit

Die Kostenfunktion für die Gesamtperiode C ist dann die Summe über die Kosten der Unterperioden:

$$(17) \quad C = \sum_{s=1}^{n} \left[d \sum_{s=1}^{s} (p_s - a_s) + u\,(p_s - p_{s-1}) \right]$$

Die Gleichungen (9) bis (15) und Gleichung (17) erfüllen die formalen Voraussetzungen für ein lineares Programm[47]. Gleichung (17) ist die zu minimierende Zielfunktion, die Gleichungen (9) bis (15) sind die Nebenbedingungen. Bei Kenntnis der Konstanten (Lagerraum L, Kapazität K, Lagerraumbedarf b, Lagerkosten d, Produktionsänderungskosten u) ist es also ohne weiteres möglich, die optimale Produktionsglättung für einen gegebenen Fall zu ermitteln.

Voller Probleme sind die Faktoren d und u.

Die Produktionsänderungskosten u, also die Umstellungskosten, die einmalig beim Wechsel auf ein anderes Produktionsniveau und dadurch vielleicht auf ein anderes Produktionsverfahren entstehen, werden in der Realität am schwierigsten festzustellen und zu messen sein. Sie können bestehen aus Kosten für die Umstellung von Maschinen, für die Einrichtung (bzw. Stillegung) von bisher stillgelegten (benutzten) Maschinen, für Einstellung und Anlernen (bzw. Entlassung) von Arbeitskräften oder Umdisposition auf Überstunden bzw. Kurzarbeit und aus einem Anteil an den Kosten des dispositiven Apparates des Betriebes (Meister, Fertigungsvorbereitung, Lohnbüro, Baubüro), der u.a. umso umfangreicher wird, je häufiger und einschneidender die Produktionsniveauänderungen sind. Gerade dieser letzte Kostenbestandteil sollte nicht vernachlässigt werden. Wie weit die Produktionsumstellungen die Größe des dispositiven Apparates beeinflussen und bestimmen, wird

48) vgl. die Ausführungen in Abschnitt 2.11, Seite 11 ff.

vielleicht im Realfall nicht eindeutig zu beziffern sein; eine Rangskala wird sich aber auf jeden Fall aufstellen lassen. - Die Produktionsänderungskosten können natürlich unterschiedlich sein, je nach dem, ob die Produktion erhöht oder erniedrigt wird. Dieser Fall läßt sich ohne weiteres in das Modell einbeziehen[49].

2.122 Modell einer Produktionsglättung für mehrere Güter

Die Betrachtungen galten zunächst dem Produktionsausgleich von einem Gut über eine Gesamtperiode. Bei mehreren Gütern in einem Betrieb - und das ist der Regelfall - gewinnt das Produktionsausgleichsproblem noch an Bedeutung, und zwar dann, wenn mehrere Güter auf einem Aggregat gefertigt werden können. Liegen die Spitzen der einzelnen Absatzkurven in verschiedenen Zeiten, so ist der Produktionsausgleich nicht schwierig: Sofern die Kapazität ausreicht, wird immer das Gut am meisten gefertigt, das gerade am meisten gebraucht wird. Dieser Ausgleich durch das Fertigungsprogramm, Gutenberg nennt ihn "Ergänzungsplanung"[50], ist die eleganteste und beste Art der Produktionsglättung; denn es wird der Betrieb gleichmäßig beschäftigt, aber für die einzelnen Güter wird die Produktion dem Absatz angepaßt, so daß keine wesentlichen Lager mit ihren Kosten und ihrem Risiko gebildet werden müssen.

Nur selten wird sich dieser Idealfall verwirklichen lassen. Wenn die Absatzspitzen zeitlich nicht gleichmäßig verteilt und nicht etwa gleich groß sind, wird ein Produktionsausgleich im vorher behandelten Sinn nötig; es muß also für einige Güter in der absatzschwächeren Zeit auf Lager produziert werden. Welche Güter und in welchem Umfang? Für diese Analyse sind die Gleichungen (9) bis (17) entsprechend zu erweitern; statt mit einem Gut wird

---

49) vgl. W. Karush und A. Vaszonyi: "Mathematical Programming ...", a.a.O., p. 142

50) E. Gutenberg, Grundlagen ....., a.a.O., Bd.1, S. 137

mit der gegebenen Anzahl von Gütern gerechnet. Es wird sich ein Produktionsplan ergeben, der soweit als möglich den Absatzkurven direkt Genüge tut und die Güter vorproduzieren läßt, die relativ die niedrigsten Lagerkosten verursachen. (Es sind dies nicht unbedingt die Güter mit den absolut niedrigsten Lagerkosten; es kann günstiger sein, ein Gut mit höheren Lagerkosten kürzer zu lagern, als ein Gut mit niedrigen Lagerkosten länger zu lagern. Nur ein Vergleich der Lagerkosten ohne Kombinationsrechnung liefert also nicht unbedingt das richtige (optimale) Ergebnis).

Das Produktionsmodell läßt sich dann wie folgt darstellen:

Für m Güter ist die Aufteilung der Gesamtproduktion P auf n Unterperioden gesucht:

$$(9a) \qquad P_i = p_{i1} + p_{i2} + \dots p_{is} + \dots + p_{in} \qquad \begin{matrix}(i=1\dots m)\\(s=1\dots n)\end{matrix}$$

Für jedes Gut i sei die Verteilung des Absatzes auf die Unterperioden bekannt:

$$(10a) \qquad A_i = a_{i1} + a_{i2} + \dots + a_{is} + \dots + a_{in} \qquad \begin{matrix}(i=1\dots m)\\(s=1\dots n)\end{matrix}$$

Für jedes Gut gilt die Gleichgewichtsbedingung (11), nämlich daß die kumulierte Produktion bis zu jedem Zeitpunkt mindestens gleich dem Absatz sein muß:

$$(11a) \qquad \sum_{t=1}^{t} p_{it} \geq \sum_{t=1}^{t} a_{it} \qquad (i=1\dots m)$$

Auch Gleichung (12) bleibt als Beschränkung der Produktion insgesamt nach oben für jedes Gut bestehen:

$$(12a) \qquad P_i = \sum_{i=1}^{n} p_{is} = A_i = \sum_{s=1}^{n} a_{is} \qquad (i=1\dots m)$$

In der Bedingung für die Begrenztheit der Produktionskapazität K_s drückt sich die Verbundenheit der einzelnen Güter deutlich aus: die Gesamtproduktion aller Güter in einer Unterperiode darf die

vorhandene Kapazität nicht überschreiten:

$$(13a) \qquad \sum_{i=1}^{m} k_i p_{is} \leq K_s \qquad (s=1...n)$$

Hierbei ist k_i der Kapazitätsbedarf je Produktionseinheit des Gutes i. In gleicher Weise können als Lagerraumbeschränkungen gelten:

$$(14a) \qquad \sum_{i=1}^{m} b_i l_{it} \leq L$$

wobei:

b_i Raumbedarf je Produktionseinheit des Gutes i

l_{it} Differenz zwischen kumulierter Produktion und kumuliertem Absatz bis zum Zeitpunkt t des Gutes i

sind.

Wenn analog zum Ein-Gut-Fall (s. Seite 37)

d_i = Lagerkosten (Zins) je Produktionseinheit des Gutes i und Unterperiode

u_i = Produktionsänderungskosten bei einer Produktionsniveauänderung beim Gut i um eine Produktionseinheit

sind, dann sind die Gesamtkosten in einer Unterperiode s:

$$(16a) \qquad C_s = \sum_{i=1}^{n} \left[\underbrace{d_i \sum_{s=1}^{m} (p_{is}-a_{is})}_{\text{Lagerkosten}} + \underbrace{u_i(p_{is}-p_{is-1})}_{\text{Produktionsänderungskosten}} \right]$$

Die zu minimierende Gesamtkostenfunktion ergibt sich als Summe über die Unterperioden:

$$(17a) \qquad C = \sum_{s=1}^{n} \sum_{i=1}^{m} \left[d_i \sum_{s=1}^{s} (p_{is}-a_{is}) + u_i (p_{is}-p_{is-1}) \right]$$

Man erkennt, daß die Zahl der Gleichungen nicht gering ist. Bei z.B. 6 Unterperioden und 10 Gütern erhält man eine Kostenfunktion mit 60 gesuchten Unbekannten p_{is} und 27 Gleichungen als Nebenbedingungen (Gleichung 11a) stellt 10 Glei-

chungen dar, (12a) ebenfalls 10, (13a) 6, (14a) 1 Gleichung).

Daraus erklärt sich, daß man bisher derartige Probleme gar nicht versucht hat quantitativ zu erfassen. Ohne die große Zahlenmengen schnell verarbeitenden Rechengeräte war es nicht möglich, mit einer großen Zahl von Gleichungen, auch von mathematisch so einfacher Form wie hier, wirtschaftlich zu rechnen. Diese "Rechenbeschränkung" ist beseitigt worden durch die elektronischen Rechengeräte mit ihren hohen Speicherkapazitäten und geringen Zugriffzeiten zu den Speichern, durch die mathematische Entwicklung von Lösungsverfahren für derartige Gleichungssysteme, die relativ wenig Rechenzeit brauchen und als Standard-Rechenprogramm jederzeit verfügbar sind, und durch die räumliche Verbreitung der Rechner, die es praktisch jedem Betrieb möglich und auch erschwinglich machen, für die fertig formulierte Rechenaufgabe Rechenstunden zu mieten. Am Rechenaufwand würde es also nicht scheitern, das Produktionsausgleichsmodell zu erweitern. In Frage käme es beispielsweise, die Lösung des evtl. gleichzeitig auftretenden Zuordnungsproblems der Produkte auf die Kapazitäten in das Modell einzubauen. Dafür müßten die Gleichungen (13a) entsprechend erweitert und die Produktionskosten in (16a) und (17a) einbezogen werden (vgl. Abschnitt 2.111, S. 11 ff.). Daß es ohne weiteres möglich ist, Kostensprünge, also auch das Überstunden- und Schichtproblem, einzubeziehen, wurde schon erwähnt. Auf derartige Verfeinerungen des analytischen Apparates sei hier aber nicht näher eingegangen. Es sei dafür verwiesen auf Holt[51] und die dort ausführlich angegebene Literatur und auf Piesch[52]. Über die praktische Durchführung einer solchen Produktionsglättung geben Magee[53] sowie Ferguson und Sargent[54] anschauliche Beispiele.

---

51) C.C. Holt, Fr. Modigliani, J.F. Muth, H.A. Simon: Planning Production, Inventories and Work Force, Englewood Cliffs, N.Y. 1960

52) W. Piesch: Produktionsglättung, Entwurf einer Dissertation, Tübingen, bislang unveröffentlicht

Das einfach formulierte Modell oben sollte zeigen, daß es möglich und bei entsprechenden Gegebenheiten auch vorteilhaft ist, die Produktionsausgleichsaufgabe quantitativ zu erfassen und zu lösen. Voraussetzung ist, daß es möglich ist, Angaben über die Absatzverteilung über die Gesamtperiode zu machen, und daß sich die erforderlichen Kostenzahlen ermitteln lassen, und zwar so, daß das daraus aufstellbare Gleichungssystem auch lösbar ist. Die zweite Voraussetzung ist eine Frage des speziellen Sachverhalts. Da es, wie erwähnt, nicht unbedingt auf absolut richtige Kostenzahlen ankommt, sondern es, wenn man den Fehler dabei beurteilen kann, zulässig ist, Vereinfachungen zu machen, wird im allgemeinen hieran eine quantitative Produktionsausgleichsanalyse nicht scheitern. Die erste Voraussetzung, Kenntnis des Absatzes und der Absatzverteilungen, ist sehr viel grundlegender. Das Produktionsausgleichsproblem ist von Bedeutung in den Industrien, deren Markt oder deren Auftragszusammensetzung mit dem Wechsel der Jahreszeiten saisonalen Schwankungen unterliegt. Das trifft also vor allem auf die konsumnahen Industrien zu, nur z.T. auch auf Investitionsgüterbereiche wie bei Landmaschinen, Baumaschinen u.ä. Wie groß gerade bei Konsumgütern die Saisonschwankungen und auch der Gesamtabsatz selbst sind, hängt u.a. vielfach von vorher nur unzureichend abschätzbaren Größen und Einflüssen, wie Witterung, Mode, Werbewirkung u.ä. ab. Es ist hier nicht der Ort, die Möglichkeiten von Absatzprognosen zu erörtern. Sie lassen sich grundsätzlich aufstellen, liefern aber Ergebnisse, denen nur ein gewisser Wahrscheinlichkeitswert zugemessen werden kann. In einer Produktionsausgleichsanalyse kann dann also nur

---

53) John F. Magee: Production Planning and Inventory Control, New York, Toronto, London, 1958, S. 133 ff.

54) R.O. Ferguson and L.F. Sargent: Linear Programming, Fundamentals and Applications, New York, Toronto, London 1958, S. 257 ff.

mit entsprechend unsicheren Absatzzahlen gerechnet werden. Gegebenenfalls ist es möglich, Wahrscheinlichkeitsverteilungen für den Absatz aufzustellen und einen stochastischen Planungsansatz zu formulieren; u.U. ist es dann zweckmäßig, alternative Produktionsausgleichsprogramme auszurechnen und sich für ein solches Programm endgültig zu entscheiden, das auch während der Gesamtplanungsperiode, wenn die Absatzprognosen genauer gemacht werden können, noch Umänderungen zuläßt. Das ist z.B. nicht der Fall bei einem Produktionsplan, der eine Vorproduktion für die Absatzspitze so spät vorsieht, daß eine evtl. sich ergebende Erhöhung oder zeitliche Vorverschiebung der Absatzspitze wegen der Kapazitätsgrenzen nicht mehr aufgefangen werden könnte. Wenn es technisch durchführbar ist, wird man fortlaufend und gleitend planen in der Weise, daß man jeweils über eine gewisse Zahl von Unterperioden plant und man immer, wenn eine Unterperiode verstrichen ist, einen neuen Plan unter Einschluß einer neuen Unterperiode aufstellt. Plant man beispielsweise jeweils über 12 Monate, und ist der Januar verstrichen, so wird Anfang Februar ein neuer Plan bis zum Januar des folgenden Jahres aufgestellt, Anfang März ein Plan bis zum Februar des folgenden Jahres und so fort. Dadurch wird erreicht, daß man zwar langfristig plant, daß aber die für die tatsächliche Fertigungseingabe wichtigsten Zukunftsgrößen (nämlich die unmittelbar folgenden Unterperioden) nur kurzfristig prognostiziert werden müssen. Fehler in der längerfristigen Prognose können also sukzessive ausgeglichen und verbessert werden und die Pläne verändern sich wegen ihrer starken Verzahnung allmählich und gleichmäßig. Als Verfeinerung ist es auch möglich, die Unterperioden je nach ihrer Entfernung vom Planungszeitpunkt zu gewichten, so daß der errechnete Produktionsausgleichsplan sich stärker nach den besser prognostizierten, bald folgenden Unterperioden und fortlaufend weniger stark sich nach den ferner liegenden, fortlaufend unsicherer prognostizierten Unterperioden richtet.

Der Umstand, daß eine quantitative Produktionsausgleichsanalyse Annahmen über den Absatz voraussetzt, entwertet sie nicht als solche. Jede Planung in die Zukunft beruht auf Annahmen mit gewisser Unsicherheit; das Planungsverfahren kann und soll dessen ungeachtet exakt sein, denn erst dann kann beurteilt werden, welche der prognostizierten Größen den größten Einfluß auf den Plan hat.[55] Der Zwang, die Annahmen über zukünftige Größen zu quantifizieren und in den Dimensionen eines Planungsansatzes auszudrücken, kann übrigens schon für sich allein verbessernd auf die Prognosen einwirken.

---

55) Es seien absichtlich nur diese kurzen und vordergründigen Erwägungen angestellt. Das Problem der Unsicherheit der Planungsunterlagen und ihrer Auswirkungen auf die Güte der Planung ist im Grundsätzlichen besonders von W. Wittmann behandelt worden. Vgl. W. Wittmann: Unternehmung und unvollkommene Information, Unternehmerische Voraussicht - Ungewißheit und Planung, Köln und Opladen 1959. Siehe auch oben S. 3.

2.13 Eigenfertigung - Fremdbezug

Zu den Planungen, die nicht nur innerbetrieblicher Natur sind, sondern direkt mit den Absatz- und Beschaffungsmarktgegebenheiten zu tun haben, gehört neben der Produktionsglättung die Planung über den Umfang von Eigenfertigung und Fremdbezug. Beides hängt methodisch und inhaltlich stark zusammen. Die Aktivität "Produktion zu Überstunden" bei der Produktionsglättung kann ebenso als Fremdbezug aufgefaßt werden; der inhaltliche Zusammenhang ist dadurch gegeben, daß man den Fremdbezug stets so planen wird, daß gleichzeitig ein Produktionsglättungseffekt erzielt wird. Dennoch werden die beiden Probleme hier getrennt behandelt, um den analytischen Apparat nicht zu kompliziert zu gestalten.

Das Problem Eigenfertigung - Fremdbezug wird im Industriebetrieb vor allem für die Halbfertigwaren und Montageteile relevant sein. Derartige Bauteile lassen sich oft gut nach außen vergeben, weil ihre Konstruktion und Fertigung für alle Betriebe der Branche gleich oder ähnlich ist, so daß sich Spezialbetriebe als Zulieferer dafür herausgebildet haben, deren Kosten und Preise mit den eigenen Herstellkosten durchaus konkurrieren können. Aber auch für Fertigwaren kann Fremdbezug in Frage kommen, nämlich dann, wenn dadurch das Absatzsortiment verbreitert wird und die Eigenfertigung sich auf wenige Sorten beschränken kann.

Von der Möglichkeit des Fremdbezuges nicht nur der Rohstoffe wird bei industrieller Fertigung vielfach Gebrauch gemacht, sei es, daß die eigene Kapazität nicht schnell ausgebaut werden kann (oder soll), sei es, daß man die Absatzschwankungen dem eigenen Betrieb fernhalten will, indem man diesem nur die "Grundlast" überträgt und die "Spitzen" durch Fremdbezug ausgleicht. In jedem Falle hat das Problem vor allem erst Bedeutung, wenn der eigene Betrieb hinreichend ausgelastet ist.

Das Problem enthält unterschiedliche Aspekte, je nach dem, ob

man es kurzfristig oder langfristig betrachtet. Langfristig kann man für jedes Gut einzeln über Eigenfertigung oder Fremdbezug entscheiden, indem man die möglichen und erforderlichen Investitionen und die sich daraus ergebenden Herstellkosten mit den Einstandspreisen abwägt. Sofern diese Investitionen für mehrere Güter verwendbar sind, ist diese Entscheidung für diese Güter gemeinsam zu treffen. Langfristig läuft also die Planung von Eigenfertigung und Fremdbezug auf eine Wirtschaftlichkeitsrechnung für Investitionen hinaus[56] und berührt somit eine grundsätzlich unternehmerische und konstitutive Entscheidung.

Kurzfristig dagegen liegen die vorhandenen Kapazitäten in Art und Umfang fest, und es gilt, nicht etwa einzeln für jedes Gut Herstellkosten und Einstandspreise abzuwägen, sondern die beste Kombination aller zugleich selbst zu fertigenden Produkte zu finden, bei der insgesamt Herstellkosten und Einstandskosten minimiert werden; denn die Güter werden die Kapazitäten je Stück unterschiedlich stark belasten, und es kann sehr wohl sein, daß die Güter, bei denen Eigenfertigung einzeln gesehen besonders vorteilhaft erscheint, die Kapazitäten stark beanspruchen und infolgedessen besonders viele der anderen Güter fremdbezogen werden müssen, so daß die Gesamtkosten größer werden als bei einer anderen Kombination. Mit dieser kurzfristigen und dispositiven Betrachtungsweise wollen wir uns hier in erster Linie beschäftigen; sie ist wegen ihrer Abhängigkeit von den Kapazitätsgegebenheiten weniger allgemeingültig, aber sie ist für die laufenden Dispositionen des einzelnen Betriebes von wesentlicher Bedeutung.

---

56) vgl. E. Schneider: Wirtschaftlichkeitsrechnung, Theorie der Investition, Tübingen und Zürich 1957
H. Brandt: Investitionspolitik des Industriebetriebes, Wiesbaden 1959

2.131 Einfaches Modell der Planung Eigenfertigung - Fremdbezug

Die kurzfristige Optimierung des Verhältnisses zwischen Eigenfertigung und Fremdbezug ist ein typisches Zuordnungsproblem, das bei geeigneter Formulierung und entsprechend gegebenen Voraussetzungen mit den Mitteln der linearen Planungsrechnung gelöst werden kann. Grundsätzlich geht es bei der kurzfristigen Betrachtungsweise, bei der die Eigenkapazitäten feststehen, um folgendes: Für jedes der n Güter, die man absetzen will, soll die gegebene Absatzmenge p_i aufgeteilt werden in die selbstgefertigten Mengen s_i und die fremdbezogenen Mengen f_i:

$$p_i = s_i + f_i \qquad (i=1...n) \tag{18}$$

Jedes der selbstgefertigten Güter s_i beansprucht bestimmte Kapazitäten j, die nach oben hin begrenzt sind, b_j. Summiert muß daher bei konstantem Input-Faktor a_{ij} je Stück sein:

$$\sum_{i=1}^{n} a_{ij}\, s_i \leq b_j \qquad (j=1...m) \tag{19}$$

Die fremdbezogenen Güter f_i werden z.T. nicht in beliebiger Menge verfügbar sein. Für sie gilt dann als Mengenbeschränkung d_i:

$$f_i \leq d_i \qquad (\text{für bestimmte } i = 1...n)^{57)} \tag{20}$$

Einige Güter i wird man nur selbst produzieren und nicht von auswärts beziehen können oder wollen. Für solche Güter gilt dann:

$$p_i = s_i \qquad (\text{für bestimmte } i = 1 ...n)^{57)} \tag{21}$$

---

57) Eine Doppelindizierung (mit ihrer eleganteren Schreibweise) sei hier unterlassen; der sachliche Hintergrund wird so m.E. deutlicher.

Diese Güter p_i können aus der Rechnung eliminiert werden, indem ihre Kapazitätsbelastung von der vorhandenen Kapazität b_j abgezogen wird, denn für sie entfällt ja das Problem Eigenfertigung - Fremdbezug. Das Entsprechende gilt für die Güter, die nur von auswärts bezogen werden können; auch sie fallen als Konstante aus einem Planungsansatz heraus:

(22) $$p_i = f_i \quad \text{(für bestimmte } i = 1..n)^{57)}$$

Ziel wird sein, bei den Gütern, die sowohl selbst gefertigt als auch von auswärts bezogen werden können, zu niedrigsten Kosten zu den Absatzmengen p_i zu kommen. Welche Kostengrößen werden dieses Ziel beeinflussen? Im einfachsten Falle sind das für die selbst herzustellenden Güter die variablen Kosten und für die zu beziehenden Güter die Einstandspreise. Das lineare Planungsprogramm wird dafür sehr einfach, weil es die Güter vornehmlich für die Eigenproduktion vorsehen wird, bei denen die Differenz zwischen Einstandspreis und variablen Kosten am größten ist. (Diese wird bei fast allen Gütern vorhanden sein, weil - abgesehen vom Zulieferergewinn - die beiden Größen nicht vergleichbar sind wegen der bei der Eigenproduktion nicht berücksichtigten fixen Kosten, die in den Planungsansatz einzubeziehen sich erübrigt, wenn sie definitionsgemäß mengenunabhängig sind, und auch anfallen, wenn das Gut überhaupt nicht selbst gefertigt wird). Der Gleichungsansatz würde dann lauten:

Unter den Nebenbedingungen (18), (19) und (20), bei denen (21) und (22) berücksichtigt sind, soll das Ziel, Kostenminimierung, erreicht werden

(23) $$\sum_{i=1}^{n} c_i s_i + \sum_{i=1}^{n} e_i f_i = \text{Minimum!}$$

wobei c_i die variablen Kosten bei Eigenproduktion eines Stückes von Gut i sind und e_i der Einstandspreis für ein Stück vom Gut i ist.

Für diesen einfachsten Fall ist von wesentlichen Einflußgrößen abgesehen worden. Baut man sie in das Modell mit ein, so gewinnt der lineare Planungsansatz als Lösungsmittel an Bedeutung, weil dann die möglichen Kombinationen nicht mehr überschaubar sind. Soweit es sich nur um zusätzliche Beschränkungen handelt, ist die Erweiterung nicht weiter problematisch. Z.B. kann es in Frage kommen, daß das verfügbare, in Umlaufgütern festlegbare Kapital begrenzt ist und daß man daher die bei der Eigenfertigung notwendig entstehende Kapitalbindung zusätzlich berücksichtigen muß. Man wird näherungsweise unterstellen können, daß diese Kapitalbindung für jedes Gut mengenproportional ist; dann gilt für das Programm (18) bis (23) als zusätzliche Beschränkung, wenn k_i die Kapitalbindung je Stück vom Gut i und K das dafür insgesamt verfügbare Kapital ist:

$$(24) \qquad \sum_{i=1}^{n} k_i s_i \leq K$$

2.132 Verbessertes Modell einer Planung Eigenfertigung - Fremdbezug

Wesentlicher wird es aber sein, die Unterstellung aufzugeben, daß die variablen Kosten c_i und vor allem die Einstandspreise e_i mengenunabhängig und konstant sind. Es ist anzunehmen, daß im allgemeinen bei steigenden Mengen die Einkaufspreise für die fremdbezogenen Güter, wenn wir zunächst nur diese betrachten, fallen werden. Es ergibt sich dann eine konvexe Kurve in der "falschen" Richtung, und ein linearisierter Planungsansatz würde zu unsinnigen Ergebnissen führen[58]. Hier stoßen wir an die Grenzen des einfachen linearen bzw. linearisierten Planungsansatzes.

---

58) Vgl. S. 28 f.

Die Planung Eigenfertigung - Fremdbezug ist trivial, wenn man nur ein Gut betrachtet. Es müssen lediglich die eigenen Kosten und der Einstandspreis verglichen werden. Kurzfristig ist Eigenfertigung lohnend, solange die variablen Stückkosten kleiner sind als der Einstandspreis. Diese Bedingung läßt sich für die Preissprünge von e ohne weiteres nachprüfen. (Kenntnis der variablen Stückkosten ist hier stets vorausgesetzt.)

Die Schwierigkeiten treten erst auf, wenn ma den hier interessierenden Fall der Mehrprodukten-Fertigung betrachtet; denn dann muß gleichzeitig das Problem der optimalen Kombination zwischen den Produkten gelöst werden. Für die kurzfristige Analyse, bei der von gegebenen Kapazitäten ausgegangen wird, wird ein exaktes Programm u.U. nur noch unter großem Aufwand rechnerisch lösbar. Denn grundsätzlich muß in einem Planungsansatz nach Art des linearisierten als zusätzliche Bedingung eingebaut werden, daß die "ungünstigen" (d.h. im Stückpreis höheren) Mengen zuerst einmal berücksichtigt werden. Im Prinzip ist das durch ein ganzzahliges Planungsprogramm[59] möglich; nämlich auf folgende Weise:

Es sei davon ausgegangen, daß die variablen Kosten c_i für die Eigenherstellung konstant seien und daß die Einstandspreise für die fremdbezogenen Mengen mengenabhängig, und zwar mit zunehmenden Mengen fallend seien. Wie bei der Formulierung eines linearisierten konvexen Planungsansatzes (Abschnitt 2.114, S. 25 ff.) kann man, entsprechend den Einstandspreissprüngen Unter-Aktivi-

---

59) vgl. W. Krelle: "Ganzzahlige Programmierungen. Theorie und Anwendungen in der Praxis", Unternehmensforschung, Bd. 2 (1958), S. 161-175; s. auch: A.H. Land und A.G. Doig: "An Automatic Method of Solving Discrete Programming Problems", Econometrica, Vol. 28 (1960), pp. 497-520 und D. Gale: The Theory of Linear Economic Models, New York, Toronto, London 1960, pp. 132

täten für die Frembezugsmengen definieren. Gleichung (18) wird dann, wenn es für jedes Gut i r Preissprünge gibt, zu

$$(26) \qquad p_i = s_i + \sum_{k=1}^{r} f_{ik} \qquad (i=1...n)$$

Jede der Teilmengen k des fremdbezogenen Gutes i hat einen Höchstbetrag bis zu dem der zugehörige Preis gilt. Wenn beispielsweise der Mengenrabatt für das Gut i so gestaffelt ist:

Preis e_{i1} bei bis zu 100 Stück
" e_{i2} " 101-300 "
" e_{i3} " 301-700 "
" e_{i4} " über 700 "

wobei $e_{i1} > e_{i2} > e_{i3} > e_{i4}$,

dann gilt als Beschränkung für die Unteraktivitäten f_{ik}:

$$(27) \qquad \begin{matrix} f_{i1} \leq 100 \\ f_{i2} \leq 200 \\ f_{i3} \leq 400 \end{matrix} \quad \text{oder allgemein } f_{ik} \leq g_k \quad \begin{matrix} (i=1,...,n) \\ (k=1,...,r) \end{matrix}$$

Ziel bleibt wie in (23) Kostenminimierung:

$$(28) \qquad \sum_{i=1}^{n} c_i s_i + \sum_{i=1}^{n} \left(e_{ik} \sum_{k=1}^{k} f_{ik} \right) = \text{Minimum!}$$

Außer den Nebenbedingungen (19), Einhaltung der Faktorbegrenzungen bei Eigenproduktion, und (26), Einhaltung der geplanten Absatzmenge, muß nun auch sichergestellt sein, daß die ersten Fremdbezugsmengen zuerst einmal voll berücksichtigt werden. Hierfür kann folgende Rechenregel als Bedingung aufgestellt werden:

$$(29) \qquad \sum_{k=1}^{k} f_{ik-1} = \sum_{k=1}^{k} g_{ik-1} \qquad (k=1...r)$$

Dadurch wird gewährleistet, daß bei einem bestimmten k alle Mengen davor in der Rechnung voll enthalten sind, denn nur dann ist die Gleichung (29) erfüllt. Für die Rechnung bedeutet das eine ganz erhebliche Komplizierung; denn sie muß im Prinzip jede mögliche Kombination aller i und k durchprobieren und die auswählen, welche Gleichung (28) minimiert. Die Zahl der Kombinationen wächst sehr schnell an. Bei z.B. nur i = 10 Gütern mit je k = 3 Preissprüngen gibt es

(30) $$k^i = 3^{10} = 59\ 049$$

Variationen von zusammengestellten k und i. Für jede dieser Möglichkeiten muß das lineare Programm durchgerechnet werden. Wenn man für eine Durchrechnung des Planungsprogrammes beispielsweise nur 10 Sekunden Rechenzeit auf einem Elektronenrechner veranschlagt und keine Nebenzeiten für Ein- und Ausgabe des Datenmaterials berücksichtigt, so brauchte man für dieses kleine Planungsprogramm von 10 Gütern rund 600 000 sec = 167 Stunden Rechenzeit. Man erkennt, daß ein solches ganzzahliges Programm für eine laufende und sich stets wiederholende Planung nicht verwandt werden kann und selbst für einmalige Planungsüberlegungen nur sehr begrenzt verwendungsfähig ist. Zwar gibt es Lösungsverfahren[60], die die erforderliche Rechenzeit dadurch nicht unwesentlich abkürzen, daß sie die Planungsaufgabe eingrenzen; denn von den vielen möglichen Kombinationen würde ein Teil von vornherein ausfallen, weil die Nebenbedingungen durch diese nicht erfüllt werden können. Andere Kombinationen können von vornherein unwesentlich sein, wenn die Preissprünge nur gering sind, so daß sie das Ziel nicht wesentlich beeinflussen können und man sie daher ohne weiteres eliminieren kann. Aber diese Vereinfachungen und Erleichterungen des Problems können

---

60) vgl. W. Krelle: "Ganzzahlige ...", a.a.O., S. 172-174

die Lösbarkeit und Anwendbarkeit des ganzzahligen Planungsansatzes nicht grundsätzlich beeinflussen, sondern nur auf einen insgesamt geringfügig größeren Zahlenumfang erweitern.[61]

Als Ergebnis bleibt zunächst, daß eine vollständige quantitative und exakte Planung von Eigenfertigung und Fremdbezug für mehrere Güter simultan nicht möglich ist, wenn für die Fremdbezugsmengen Mengenrabatte in Frage kommen. Für den speziellen Anwendungsfall bleibt also nur übrig, nach einem geeigneten Näherungsverfahren Ausschau zu halten. Hierfür lassen sich allgemein nur schwer Regeln angeben. Im Prinzip werden die Näherungen darauf hinauslaufen, entweder das Problem an sich zu reduzieren oder das Problem im Zahlenumfang zu vereinfachen.

Eine Reduktion des Problems selbst wäre es beispielsweise, wenn man die Mengenrabatte vernachlässigt und nur das einfache Planungsprogramm (18) bis (24) löst; das wäre dann gerechtfertigt, wenn die Mengenrabatte für die Güter eine ungefähr gleiche Mengenstaffelung und einen etwa gleichen prozentualen Preisnachlaß haben, so daß durch Vertauschen der in Hinblick auf die Faktorbeschränkungen optimal ausgewählten Mengen an Eigenfertigung und Fremdbezug keine oder keine wesentliche Gesamtkostenverbesserung mehr erreicht werden kann. Eine andere Reduktion

---

61) Wir vermögen nicht abschließend zu beurteilen, ob die Überlegungen von Gomory und Beale hier einen grundsätzlichen Wandel bringen werden. Vgl. R. E. Gomory: "Outline of an Algorithm for Integer Solutions to Linear Programs", Bull. Am. Math. Soc., 1958, pp. 275-278; E. M. Beale: "A Method for Solving Linear Programming Problems when Some but not All of the Variables must take Integral Values", Technical Report Nr. 19, Princeton University, July 1958; beide zitiert nach: R. E. Gomory and W. J. Baumol: "Integer Programming and Pricing", Econometrica, Vol. 28 (1960), pp. 521-550. Siehe auch: G. B. Dantzig: "On Significance of Solving Linear Programming Problems with Some Integer Variables", Econometrica, Vol. 28 (1960), pp. 31-44, W. Dinkelbach und F. Steffens: "Gemischt ganzzahlige lineare Programme zur Lösung gewisser Entscheidungsprobleme", Unternehmensforschung, Bd. 5 (1961),

des Problems wäre möglich, wenn die technischen Koeffizienten alle die gleiche Größenordnung haben, so daß man auf die exakte Lösung des Zuordnungsproblems der Eigenfertigung auf die Kapazitäten verzichten könnte und die Güter zur Eigenfertigung vorsieht, bei denen für erhöhten Fremdbezug am wenigsten Mengenrabatt gewährt wird. In dieser Weise verfährt man bisher wohl am häufigsten bei der Planung von Eigenfertigung und Fremdbezug; man braucht hier keine eigentliche Planungsrechnung anzustellen, sondern vergleicht nur für jedes Gut die Kosten- und Einkaufswerte und sucht einzeln das Kostengünstigste heraus, ohne die Kombinationen zu berücksichtigen.

Will oder kann man auf diese prinzipiellen Vereinfachungen nicht eingehen, so muß der Ansatz (26) bis (29) im Umfang der Zahlen und Kombinationen eingeschränkt werden. Ob das möglich ist, hängt von den Gegebenheiten des Spezialfalles ab. In Frage kommt es z.B., gewisse Preissprünge, die klein gegenüber anderen sind, zu vernachlässigen, oder Gütergruppen zu bilden von Gütern mit jeweils ungefähr gleichen technischen Koeffizienten und Rabattsätzen, deren Aufteilung untereinander wenn für die Gruppe der näherungsweise optimale Wert ermittelt ist, der Willkür überlassen bleibt und auf die Kostengestaltung keinen wesentlichen Einfluß mehr hat. Bei guter Kenntnis des Sachverhalts ist es vielleicht auch möglich, bestimmte Kombinationen, die besonders kostengünstig erscheinen, auszuwählen und nur mit diesen zu rechnen oder eine negative Auswahl der schlechten Kombinationen zu treffen und nur mit dem Rest zu rechnen. Denn wenn man die Matrix der technischen Koeffizienten betrachtet, wird man Güter, die die Engpaßabteilungen

---

61) Forts.: ... S. 3-14, M. Terebesi: "Bemerkungen zum Verfahren von Gomory zur Bestimmung ganzzahliger Lösungen von linearen Programmen", Unternehmensforschung, Bd. 5 (1961), S. 197-215.

stark belasten und ungefähr gleiche oder höhere Rabatte als die anderen Güter haben, ausscheiden und zum Fremdbezug erst einmal vorsehen können. Werden dann von dem Rest die Kapazitäten nicht voll ausgelastet, so kann man einige dieser Güter wieder in den Produktionsplan aufnehmen, ohne daß die Planungsrechnung unter Einschluß dieser ausgesonderten Güter zu wesentlich anderen Ergebnissen gekommen wäre. Um festzustellen, welche Größen für das Problem besonders einflußreich sind, ist es gegebenenfalls erforderlich und zweckmässig, das Problem einmal in größerem Umfang durchzurechnen. Man kann dabei für die Güter ermitteln, innerhalb welcher Grenzen man die Mengen verändern kann, ohne daß die Lösung sich ändert, und gewinnt damit Parameter, die für die späteren Planungen, bei denen im allgemeinen Daten der gleichen Grössenordnung vorliegen, verwandt werden können[62].

Man könnte die Frage stellen, ob eine derartige Planung, die schon in den Quantitäten nur näherungsweise ist und die qualitative Größen ganz vernachlässigt, noch sinnvoll ist. Denn man darf nicht vergessen, daß selbst eine exakte Planung, die auf als richtig erachteten technischen Koeffizienten, Kosten und Preisen basiert, nur eine Richtschnur bilden kann. Die Entscheidung, ob man nach ihr verfährt, bleibt zunächst immer noch offen, weil imponderabile Größen, wie das Prestige, alles selbst gefertigt zu haben, oder eine bessere Terminsicherheit bei der Eigenfertigung, oder Gesichtspunkte der Kompensation mit den Fremdlieferern durchaus für eine Abweichung von dem errechneten Plan sprechen können. Die Planungs—rechnung kann dann

---

62) Zum Problem des Parametrischen Planens vgl.: T. L. Saaty and S. I. Gass: "Parametric Objective Function", Part 1: Operations Research, Vol. 2 (1954), pp. 316-320; Part 2: Operations Research, Vol. 3 (1955), pp. 395-401 und J. E. Kelley jr.: "Parametric Programming and the Primal-Dual Algorithm", Operations Research, Vol. 7 (1959), pp. 327-334

aber angeben, wieviel diese Abweichung kostet, bleibt also auch dann noch von Bedeutung. Wenn nun diese qualitativen Einflüsse groß sind und die Rechnung wegen der erforderlichen Näherungen ungenau ist, so bietet es sich an, auf diese ganz zu verzichten und durch bloße Schätzung und Intuition das Problem Eigenfertigung - Fremdbezug zu lösen. Damit würde man sich aber eines nicht unwesentlichen Vorteils von Planungsrechnungen begeben, der gerade bei der kurzfristigen Planung von Eigenfertigung und Fremdbezug von Bedeutung ist: Ihr Sinn liegt nicht nur in der Ermittlung einer exakten, für die jeweiligen Voraussetzungen optimalen Lösung, sondern vor allem im ganzheitlichen, objektiven Denken. Zwischen den Abteilungen eines Industriebetriebes besteht aus der Natur der Sache her eine Antinomie, denn jede versucht, ihre Interessen zu vertreten und voranzutreiben. Die Konstrukteure wollen gern die Erzeugnisse voll selbst entwickeln und passen sich nur widerwillig eventuellen technischen Gegebenheiten bei fremdbezogenen Teilen (Abmessungen, Material, Qualität) an; die Fertigungstechniker wollen gern Erzeugnisse, in denen möglichst viele gleiche Teile sind, damit die Stückzahlen der Teile hoch werden und die Zahl der Werkzeuge für die Maschinen und die Zahl der Teile überhaupt begrenzt bleibt; die Kaufleute kaufen lieber genormte und handelsübliche Teile ein als Spezialanfertigungen. Ein Planungsansatz verdeutlicht diesen zunächst als bloßen Interessentenkonflikt erscheinenden Widerstreit als echten Interessenkonflikt und macht den Beteiligten erst klar, daß Abstriche bei den Einzelinteressen sich positiv auf das Gesamtinteresse auswirken können. Diese Interdependenz der Einzelinteressen untereinander und mit dem Gesamtinteresse wird leicht verkannt - eine Folge der Betriebsblindheit und Horizontverengung bei Arbeitskräften, die lange am gleichen Arbeitsplatz tätig sind. Ein rechnerischer Planungsansatz, und wenn er nur grob angenähert ist, versachlicht diesen Abstimmungsprozeß.

2.14 Innerbetriebliche Zuordnungsprobleme

Die Möglichkeit zur Lösung von Zuordnungsproblemen durch quantitative Analyse ist begrenzt, wenn man es mit Planungsaufgaben zu tun hat, die unmittelbar mit dem Beschaffungsmarkt oder dem Absatzmarkt zusammenhängen; denn dann ist die Planungsrechnung nur so genau, wie die Einschätzung der zukünftigen Marktdaten. Auch ein stochastischer Planungsansatz ändert daran im Prinzip nichts. Für Probleme wie die Produktionsglättung und die Entscheidung Eigenfertigung - Fremdbezug kann daher - wie dargelegt - die exakte Rechnung nur Richtschnur, nicht aber endgültige Anweisung bilden.

Diese grundlegende Einschränkung gilt nicht für die rein innerbetrieblichen Zuordnungsprobleme; denn für sie stehen die relevanten Daten fest. Die Methoden der linearen Planungsrechnung und ihre Erweiterungen finden hier also ihr eigentliches Anwendungsfeld, weil die durch sie ermittelten Lösungen unmittelbar als Entscheidung dienen können. Soweit man die innerbetrieblichen, dispositiven Zuordnungsprobleme durch einen exakten Planungsansatz greifen kann, kann man sie also laufend, so oft es erforderlich ist, berechnen lassen und die Ergebnisse unmittelbar verwenden; man wird damit einzelne Entscheidungen, die bisher intuitiv und auf der Basis mangelhafter Information kurzfristig gefällt werden mußten, verbessern und beschleunigen können und dürfte so im allgemeinen eine echte Rationalisierung erzielen. Welcher Art solche innerbetrieblichen Zuordnungsprobleme sind, ist grundsätzlich schon im Abschnitt 2.111 (S. 11 ff.) erörtert worden. Hier kann also darauf aufgebaut und im wesentlichen nur auf Besonderheiten im Planungsansatz bei einzelnen Problemkreisen hingewiesen werden.

2.141 Zuordnung der Produkte auf Fertigungsverfahren

Der einfache lineare Planungsansatz eignet sich vor allem für

die Auswahl der Maschinen und Arbeitsverfahren. Fast bei jeder industriellen Fertigung sind, gerade für den bestehenden Betrieb und kurzfristig, mehrere Herstellungsverfahren möglich. Gewisse Maschinenarbeiten lassen sich durch Handarbeit ersetzen und umgekehrt, manche Arbeitsgänge lassen sich auf verschiedenen Maschinen technisch gleichwertig ausführen (z.B. ist spanabhebende Oberflächenbearbeitung auf Drehbänken, Fräsmaschinen oder Hobelbänken und dort gegebenenfalls teilautomatisch oder vollautomatisch möglich), die Verwendung anderen, technisch gleichwertigen Materials kann zu Änderungen in der Art der Arbeitsgänge oder in den Bearbeitungszeiten führen, u.ä. Langfristig gibt es fast immer nur ein technisch und kostenmäßig günstigstes Fertigungsverfahren. Dieses wird im allgemeinen nach fertigungstechnischen Gesichtspunkten ausgewählt, ohne daß auf den vorhandenen Maschinenpark und seine Belastungen Rücksicht genommen wird. Ist es technisch anspruchsvoll, müssen dafür besondere Anlagen oder Werkzeuge angeschafft werden, so ist man auf dieses Verfahren auch kurzfristig festgelegt, und es erübrigt sich ein Planungsansatz zur Auswahl des kurzfristig günstigsten Fertigungsverfahrens, da es nur eines gibt. Lassen sich dagegen die Verfahren (Prozesse) technisch substitutieren, so kann sehr wohl kurzfristig ein - einzeln gesehen - kostenmäßig ungünstigeres Verfahren insgesamt kostengünstig sein, wenn es dafür weniger ausgelastete Kapazitäten beansprucht. Aufgabe der Produktionsplanung, insbesondere der technischen Fertigungsplanung und -vorbereitung, wird es sein, für die Fertigung der geplanten Güter da, wo es ohne Schwierigkeiten möglich ist, alternative Fertigungsverfahren anzugeben, im Sinne der linearen Planungsrechnung also für ein Gut mehrere Prozesse zu definieren und deren technische Koeffizienten zu bestimmen, um so dem Betrieb eine gewisse Flexibilität zu erhalten.

Ein Problem wird dabei stets sein, für jedes Fertigungsverfahren geeignete Kostengrößen zu ermitteln. Hier reichen angenäherte, relativ richtige Werte aus[63]; denn diese dienen ja nur als Auswahlkriterium, nicht aber als Abrechnungs- und Kontrollgrößen. Da man zwischen vorhandenen und anderweitig schon praktizierten Fertigungsverfahren auswählt, muß eine Bezifferung ihrer variablen Kosten eigentlich immer möglich sein, ohne daß besondere Arbeitsstudien und Zeitmessungen erforderlich werden. Schwierig wird es jeweils sein, die mengenproportionalen von den fixen Gemeinkosten zu trennen. Man wird oft aber annehmen können, daß sich die variablen Gemeinkosten entsprechend den direkt meßbaren Einzelkosten verhalten. Dann ist es gerechtfertigt, als variable Kosten nur die Einzelkosten zu verwenden, weil auch so die Kostenrelationen, auf die es nur ankommt, richtig sind. Für den Anwendungsfall wäre das selbstverständlich genau zu prüfen. Hier werden u.U. beträchtliche Modifikationen anzubringen sein.

Der formale Ansatz für die Zuordnung von Fertigungsverfahren auf Kapazitäten lautet dann[64]:

Es ist das Ziel, Kostenminimierung,

(31) $$\sum_{i=1}^{n} c_i \, x_i = \text{Minimum !}$$

anzustreben unter den Bedingungen:

(32) Faktorbegrenzung $$\sum_{i=1}^{n} a_{ij} \, x_i \leq b_j \qquad (j=1 \ldots m)$$

(33) Einhaltung des Absatzplanes $$M_k \leq \sum_{i} x_i \qquad \begin{matrix}(k=1 \ldots r)\\(i=1 \ldots n)\end{matrix}$$

(34) Nicht-Negativität $$x_i \geq 0 \qquad (i=1 \ldots n)$$

63) Vgl. Seite 25.
64) Vgl. Seite 12 und 13.

Hierbei sind:

c_i = Proportionale Kosten für eine Einheit eines nach Verfahren i hergestellten Gutes

x_i = gesuchte zu produzierende Menge nach Verfahren i

a_{ij} = Bedarf an Faktor j für eine Einheit eines nach Verfahren i hergestellten Gutes

b_j = vorhandene Kapazitäten

k = Arten der zu produzierenden Güter

M_k = zu produzierende Menge des Gutes k
Diese Produktionsmenge kann je Gut k auf verschiedene Herstellungsverfahren i aufgeteilt werden

2.142 Ermittlung der optimalen Produktkombination und Zuordnung auf Fertigungsverfahren

Die Gleichungen (31) bis (34) sind der Planungsansatz für einen fest gegebenen Absatzplan (M_k), für den bei gegebenen Anlagen und Kapazitäten (b_j) die kostengünstigste Kombination der Fertigungsverfahren (i) ermittelt werden soll. Das Planungsproblem wird nun oft zusätzlich aus etwas anderem bestehen: Der Absatzplan ist nicht fest gegeben, sondern es liegen Mindestmengen und Höchstmengen für jedes Gut fest, und innerhalb dieser Mengenspielräume darf frei entschieden werden, so daß die günstigste Kombination von Produktmengen erreicht wird.
Als Zielkriterium für die "Günstigkeit" kommen dann nicht mehr die Kosten in Frage (beim Ziel "Produktion zu geringsten Gesamtkosten" würden jeweils nur die Mindestmengen ausgewählt werden), sondern zu maximierende Größen wie der Gewinn oder die Stückzahl oder die Auslastung der Kapazität. (Diese

drei Zielsetzungen sind durchaus nicht identisch, nur in Einzelfällen können sie zusammenfallen.) Im Regelfall, beim noch überschaubaren mittelgroßen Betrieb, wird Gewinnmaximierung bei Erfüllung bestimmter Mindestmengen das erklärte Ziel sein. Das bedeutet, daß man für einen quantitativen Planungsansatz für jeden Prozeß eine Stückgewinngröße g_i kennen muß. Ist diese Feststellung von Stückgewinngrößen möglich? Sicherlich nicht im Sinne der Definition: Betriebsgewinn = Erlös - Kosten, denn es wird unmöglich sein, für jeden Prozeß außer den direkt zurechenbaren, mengenproportionalen Einzelkosten die mengenproportionalen Gemeinkosten und die fixen Kosten anzugeben, um auf diese Weise die "richtigen" Gesamtkosten zu ermitteln. Für einen Planungsansatz kommt es aber auf eine in dieser Weise sauber abgegrenzte Gewinngröße nicht an. Er führt zum gleichen Ergebnis, wenn man als Stückgewinngröße den Preis abzüglich der variablen Kosten nimmt. Diese Differenz kann, wenn man, wie oben, konstante Produktionskoeffizienten und konstante Grenzkosten unterstellt, so daß die variablen Kosten gleich den Grenzkosten sind, als Grenzerfolg definiert werden[65]. Die Summe Stückzahl mal Grenzerfolg (Poller bezeichnet sie als "Kontributionsmarge"[65]) muß, wenn Gewinnmaximierung angestrebt wird, maximiert werden; denn sie ist der Beitrag zur Deckung der fixen Kosten insgesamt und des Gewinnes. Diese Kontributionsmarge ist also um den (gegebenenfalls im einzelnen nicht ohne Schwierigkeiten meßbaren und zurechenbaren) konstanten Faktor der fixen Kosten größer als der Gewinn. Als Zielkriterium für einen Planungsansatz kommt sie, da wegen des konstanten Fehlers die Gewinnrelationen richtig bleiben, ohne weiteres in Frage.

---

65) H. Poller: Kostenrechnung bei konkurrierender Produktion, a.a.O., S. 66

Unterstellt man, daß die Preise für die abzusetzenden Güter gegeben sind und daß es, wie oben, möglich ist, für jeden Prozeß die variablen Kosten hinreichend genau anzugeben, so lautet der formale Planungsansatz zur Auswahl der in Hinblick auf die vorhandenen Kapazitäten günstigsten Fertigungsverfahren und der innerhalb von gegebenen Mengenspielräumen günstigsten Mengenkombinationen:

Es ist das Ziel, Gewinnmaximierung,

$$(35) \qquad \sum_{i=1}^{n} (q_i - c_i)x_i = \text{Maximum !}$$

anzustreben unter den Bedingungen:

$$(36) \quad \text{Faktorbegrenzung} \qquad \sum_{i=1}^{n} a_{ij}\, x_i \leq b_j \qquad (j=1\ldots m)$$

$$(37) \quad \text{Einhaltung der Mengenspielräume} \qquad M_k \leq \sum_{i} x_i \leq H_k \qquad \begin{matrix}(k=1\ldots r)\\(i=1\ldots n)\end{matrix}$$

Hierbei sind:

k = Arten der zu produzierenden Güter

M_k = zu produzierende Mindestmenge des Gutes k

H_k = zu produzierende Höchstmenge des Gutes k
Diese Produktionsmengen können je auf verschiedene Herstellungsverfahren i aufgeteilt werden

x_i = gesuchte zu produzierende Menge nach Verfahren i

b_j = vorhandene Kapazitäten

a_{ij} = Bedarf an Faktor j für eine Einheit eines nach Verfahren i hergestellten Gutes

c_i = variable Kosten für eine Einheit eines nach Verfahren i hergestellten Gutes

q_i = Preis für eine Einheit des Gutes i (ist für alle i, die zu einem k gehören, gleich).

Wenn man den Planungsansatz (35) bis (37) dahingehend erweitert, daß man nicht nur von Mengenspielräumen ausgeht, sondern über diese Spielräume noch Absatz-Wahrscheinlichkeitsverteilungen annimmt, (die Höchstmengen werden schwerer, d.h. unwahrscheinlicher abzusetzen sein als die kleineren Mengen), so wird ein solcher kombinierter Produktions-Absatz-Planungsansatz zunehmend marktorientiert.

Auf diese methodische Erweiterung sei hier aber nicht eingegangen, weil sie weniger die hier interessierende reine Produktionsplanung und mehr die Absatzplanung berührt[66].

Die Planungsansätze (31) bis (34) und (35) bis (37) behandeln in ihrem Wesen ein Problem, das die Betriebswirtschaftslehre oft nur unter speziellem Gesichtspunkt und nicht allgemeingültig sieht: das Problem der verbundenen Produktion. Geläufig ist der Fall der technisch verbundenen Produktion, der Kuppelproduktion, bei der mit technisch-zwangsläufiger Notwendigkeit bei der Herstellung eines Gutes im gleichen Produktionsgang auch andere Güter anfallen (typisches Beispiel: Koks - Gas)[67]. Hierbei stellt sich ganz deutlich das Problem, daß Absatz- und Produktionsplanung und Kostenrechnung nicht für ein Gut einzeln, sondern nur für den Komplex der komplementären Güter zusammen aufgestellt werden können. Soweit die komplementären Güter in absolut festem Mengenverhältnis anfallen, ist, wenn man nicht aus dem technologischen Prozeß eindeutige Zurechnungskriterien entwickeln kann, eine Einzel-Kostenermittlung

66) Vgl. hierzu z.B. W. Piesch: "Über einige Modelle der Absatzplanung", Unternehmensforschung, Bd. 3 (1959), S. 51-69 und G.B. Dantzig: "Linear Programming under Uncertainty", Management Science, Vol. 1 (1955), pp. 197-206; D. Dannerstedt: "Production Scheduling for an Arbitrary Number of Periods given the Sales Forecast in the Form of a Probability Distribution", Operations Research, Vol. 3 (1955), pp. 300-318

für die Güter unmöglich. Entsprechend sinnlos ist es dann, für die Güter einzelne Absatzpläne und daraus Produktionspläne aufzustellen. Soweit das Mengenverhältnis solcher komplementären Güter in gewissen Grenzen variiert werden kann (Beispiel: Verarbeitung von Rohöl zu den leichteren und schwereren Destillaten), lassen sich bei Konstanz der Mengen der übrigen Kuppelprodukte die partiellen Grenzkosten der einzelnen Produkte grundsätzlich feststellen; darauf aufbauend können Absatzplan und Produktionsplan festgelegt werden, und zwar für jedes Gut einzeln, aber so, daß die Kombination der Güter zieloptimal ist und sich im zulässigen Bereich der Mengenproportionen bewegt.

Nichts anderes stellt im Grunde der Fall der ökonomisch verbundenen Produktion dar, wie er oben im linearen Planungsansatz behandelt wurde. Die im Produktionsprogramm und im Absatzplan vorgesehenen Produkte mögen zwar einzeln und jedes für sich hergestellt werden können, sie benutzen aber zu einem großen Teil dieselben Produktionsanlagen und -einrichtungen und denselben dispositiven Apparat des einen Betriebes, in dem sie hergestellt werden sollen, sie konkurrieren also um die Produktionsfaktoren des Betriebes. Poller[68] bezeichnet daher - wohl im Anschluß an Lohmann[69] - diese ökonomisch verbundene Produktion als "konkurrierende Produktion". Diese Verbundenheit zwischen den Produkten des Betriebes ist insbesondere kurzfristig von Bedeutung, wenn der Betrieb insgesamt voll ausgelastet ist und die Anlagen nicht so schnell erweitert werden können; sie besteht aber auch, wenn nur einzelne Abteilungen oder Anlagen als Engpaß voll beschäftigt sind, weil

---

67) Vgl. z.B. H. Meßmann: Anschauliche Theorie der verbundenen Produktion, Meisenheim-Wien 1952; P. Riebel: Die Kuppelproduktion, Köln und Opladen 1955; auch A. Angermann: Gleichgewichtskalkulation, Meisenheim 1951

68) Kostenrechnung bei konkurrierender Produktion, a.a.O.

69) M. Lohmann: Einführung in die Betriebswirtschaftslehre, 2. neubearb. Aufl. Tübingen 1955, S. 77

durch andere Produktkombinationen die Engpässe vielleicht zugunsten der unterbeschäftigten Abteilungen entlastet werden können. Weil man einen teilweise nicht ausgelasteten Betrieb nicht ohne weiteres erweitern wollen wird, kann das "Konkurrenzproblem" dann sogar nicht nur kurzfristig gegeben sein.

Die Kostenrechnungsverfahren (Prinzip der Vollkostenrechnung und Prinzip der Grenzkostenrechnung) gehen auf dieses Kombinationsproblem nicht ein, auch soweit sie nicht nur den Vergleich von Soll und Ist und deren Abrechnung, sondern die zukünftige Planung bezwecken; denn ihnen ist im Grundsatz jedes rechnerische Kalkül, mit Ausnahme der einfachen Addition und Prozentrechnung, fremd, weil man stets im Prinzip von der Einzelproduktion ausgeht. Zwar trägt man der Verbundenheit mehrerer Produkte in einem Betrieb durch die "Gemeinkosten" Rechnung. Ziel ist aber bei der Zuschlagskalkulation immer nur, einen geeigneten Schlüssel für deren Zurechnung auf die Produkte zu entwickeln und für jedes Produkt die "richtigen" Gesamtkosten zu ermitteln, um auf dieser Grundlage die Produktionsplanung für jedes Gut aufzubauen. Stößt man an die Kapazitätsgrenzen, so werden die Güter bevorzugt, bei denen die Differenz Preis - Gesamtkosten am größten ist. Die auf dem Grenzprinzip aufbauenden Kalkulationen, wie die Grenzkostenrechnung oder das "Direct Costing", trennen zwar in fixe und variable Kosten und gehen nicht von der Fiktion der Zurechenbarkeit der fixen (Gemein-)Kosten aus; stößt man an die Kapazitätsgrenzen, so werden die Güter bevorzugt, bei denen die Differenz Preis - variable Kosten am größten ist, und man kommt damit zu anderen Ergebnissen, weil die Güter bevorzugt sind, die besonders viel zur Deckung der fixen Kosten beitragen. Aber auch dieses Verfahren geht wie die Zuschlagskalkulation nicht auf die Güter als Komplex und ihre Belastungen des Betriebes ein, sondern betrachtet sie einzeln. Beide Verfahren werden so-

mit dem Problem der ökonomisch verbundenen Produktion nicht gerecht[70]. Die Zuschlagskalkulation versagt als Planungsinstrument, weil es logisch nicht möglich ist, für den Komplex der Kosten, der wegen der zwar nicht technisch-zwangsläufigen, aber faktischen Verbundenheit der Produkte nicht in einem direkten Zusammenhang mit den einzelnen Produkten und ihren Ausbringungsmengen steht, eine eindeutige Verursachung nachzuweisen und entsprechend die Zurechnung vorzunehmen. Eine Grenzkostenkalkulation beruht zwar nicht auf diesem prinzipiellen Mangel, aber auf das Planungsproblem, daß nämlich durch eine geeignete Kombination der Produkte das Ziel (Gewinnmaximierung oder Mengenmaximierung oder Kostenminimierung) beeinflußt wird, geht sie auch nicht ein, weil sie die Produktmengen nacheinander auswählt, bei denen die Differenz Preis - variable Kosten am größten ist, und dabei nicht berücksichtigt, daß gerade diese Güter die Kapazitäten besonders stark belasten können und daß Kombinationen, die (einzeln gesehen) offenbar weniger günstig hergestellte Produkte enthalten, zu größeren Mengen und zu größerem Gesamtgewinn führen können. Die Auswahl der besten Verfahrens- und Produktkombinationen kann nur durch ein rechnerisches Planungsverfahren wie etwa das lineare Programm geschehen, das auf einer Betrachtung der Kosten aller Güter zugleich basiert, den Einfluß der Zusammensetzung des Produktionsplanes berücksichtigt und als Auswahlkriterium für die Produktkombinationen nur die direkt zurechenbaren Einzelkosten verwendet und dessen Mathematik diesem Kombinationsproblem auch gerecht wird[71].

---

70) Eine grundlegende Darstellung der Probleme der Kostenrechnung bei ökonomisch verbundener, konkurrierender Produktion und eine Diskussion mit den vorhandenen Kostenrechnungsverfahren findet man bei H. Poller, a.a.O. Siehe auch: W. Wenke: "Zur Kalkulation von Kuppelprodukten", Zeitschr. f. Betriebswirtschaft, 31. Jahrg. (1961), S. 12-19

71) Vgl. hierzu W. Kilger: "Produktionsplanung einschließlich Planung des Fertigungsprogrammes", in: Dynamische Betriebsplanung zur Anpassung an wirtschaftliche Wechsellagen,

Hierin liegen der Sinn, die Aufgaben und auch die Grenzen derartiger Planungsansätze. Die ökonomisch verbundene Produktion ist in sehr vielen Industriebetrieben, soweit sie nicht nur mehr oder weniger Urproduktion oder die Produktion nur eines speziellen Gutes einer Sorte betreiben, gegeben. Planungsansätze, die diesem Umstand Rechnung tragen, sind daher in jedem Falle ein Fortschritt, auch wenn sie auf unvollkommenen Daten beruhen und dadurch nicht absolut richtig sind. Sie lassen erkennen, welches die einflußreichsten Größen sind und welche Daten vor allem genauer ermittelt werden sollten.

Es ist hier zunächst immer der Fall der optimalen Produktkombination und Zuordnung zu Fertigungsverfahren bzw. Maschinen diskutiert worden. Dieser ist wohl in der Tat das zentrale Problem innerbetrieblicher Zuordnungen. Aber es versteht sich von selbst, daß der entwickelte Planungsansatz und die damit verbundenen Überlegungen allgemeingültig sind und auch auf andere verwandte betriebliche Zuordnungen zutreffen. Man denke etwa an folgende Probleme: Auswahl des günstigsten Materials für die Produkte bei bestehender partieller Materialknappheit; Auswahl der am wenigsten Arbeitskraft erfordernden Prozesse bei Knappheit an Arbeitskräften, Auswahl der am wenigsten Umlauf-Kapitalbindung erfordernden Güter und Prozesse bei Liquiditätsanspannung, u.ä. Ihrem Charakter nach sind solche Probleme gleich dem oben diskutierten und analog anzusetzen. - Durch den linearen Planungsansatz zunächst nicht gelöst werden alle Fragen, die mit dem Zeitablauf zusammenhängen, wie etwa die Arbeitsfolgeplanung, oder solche, die mit den Losgrößen und Zwischenlagern zu tun haben. Darauf soll dann in späteren Abschnitten eingegangen werden.

---

71) Forts.: ...Schriftenreihe der Arbeitsgemeinschaft Planungsrechnung e.V., Bd. 2, Wiesbaden 1959, S. 66-82, insbesondere S. 77

2.143 Zwei Beispiele für spezielle Zuordnungen

Neben dem grundsätzlichen Problem der innerbetrieblichen Produktionsplanung, der Zuordnung der zu fertigenden Produkte auf die maschinellen Anlagen und Verfahren, können auch spezielle Teilprobleme der betrieblichen Planung Zuordnungscharakter haben und in gleicher Weise angesetzt und gelöst werden. Zwei typische Beispiele dafür sollen hier kurz skizziert werden: ein Transportproblem und ein Mischungsproblem.

2.1431 Innerbetriebliche Transportplanung

Die Mehrstufenfertigung im Industriebetrieb geschieht zumeist in Werkstattfertigung, d.h. in "abgeschlossenen örtlichen Einheiten, in denen Maschinen gleichen Typs und gleicher Funktionen und Handarbeitsplätze mit gleicher Verrichtung konzentriert sind"[72]. Das erfordert, daß die Halbfabrikate zwischen den Werkstätten transportiert werden müssen. Beim Mehrproduktenbetrieb läßt sich der Transport meist nicht ohne weiteres automatisieren, sondern man verwendet, um den wechselnden Anforderungen hinsichtlich Transportmenge und -weg gerecht werden zu können, frei bewegliche und lenkbare Transportmittel, wie Elektrokarren, Lorenbahnen, Lieferwagen, Handwagen u.ä. Wie sind die erforderlichen Transporte auf diese Transportmittel aufzuteilen? Ständig wird man eine bestimmte Anzahl von Betriebsrundfahrten, die alle Abteilungen und Werkstätten berühren, vorsehen; diese werden aber nur für den Gelegenheitstransport und geringfügige Mengen sinnvoll sein. Für den laufenden Transport der Halbfabrikate zwischen den Werkstätten werden Einzelfahrten oder Gruppenfahrten zu geringeren Transportzeiten und Gewichts-Längen-Leistungen und damit zu niedrigeren Transportkosten führen. Die einzelnen

---

72) Nach K. Mellerowicz: Betriebswirtschaftslehre der Industrie, 3. Aufl., Bd. 2, Freiburg 1958, S. 127

Transportmittel i werden dabei unterschiedliche Kostencharakteristiken haben, und es gilt, zwischen ihnen die Transportmengen zu verteilen.

Die Mengen, die in einer bestimmten Zeitperiode zwischen den Abteilungen zu befördern sind, werden sich hinreichend und durchschnittlich angeben lassen, insbesondere, wenn die Planungsperiode nicht zu lang gewählt ist (z.B. eine Woche). Für ihren Transport werden sich bestimmte Routen j auswählen lassen, die bestimmte Abteilungen berühren und die durch die verschiedenen vorhandenen (oder möglichen) Transportmittel bedient werden können. Die auf diese Routen entfallenden Transportmengen ergeben sich somit aus den festgestellten Einzel-Beförderungsmengen.

Für jedes Transportmittel i müssen nun, um zu einem Planungsansatz zu kommen, die Transportkosten c_{ij} je Mengeneinheit für die einzelnen Routen j festgestellt werden. Diese werden in erster Linie von den (bekannten) Entfernungen und Wege-Besonderheiten (Fahrstuhlbenutzung, Einbahnwege, Steigungen u.ä.) abhängen. Ein linearer Planungsansatz gelingt, wenn diese Stücktransportkosten c_{ij} annähernd konstant über den Mengenbereich sind. Das kann der Fall sein, wenn für den Transport auf einer Route eines Transportmittels bestimmte Mindestmengen (z.B. so, daß mindestens der halbe Laderaum ausgenutzt wird) gewährleistet werden, weil damit vielleicht die Zahl der Fahrten und die fahrtfixen Kosten im wesentlichen festliegen und die für die einzelnen Transportmittel unterschiedlichen Ladekosten und Fahrtkosten ausschlaggebend werden.

Das Planungsproblem besteht dann in folgendem (vgl. die Übersicht):

Transportmittel \ Routen	1	2	...	j	...	m	Kapazität der Transportmittel
1	x_{i1}	x_{i2}	...	x_{ij}	...	x_{1m}	a_1
2	.			.		.	a_2
.	.			.		.	.
.	.			.		.	.
.	.			.		.	.
i	.			x_{ij}		.	a_i
.	.			.		.	.
.	.			.		.	.
.	.			.		.	.
n	x_{n1}		...	x_{nj}	...	x_{nm}	a_n
zu befördernde Mengen	b_1	b_2	...	b_j	...	b_m	

Es sind die Transportmengen mittels des Transportmittels i auf der Route j, x_{ij}, so auf die Transportmittel aufzuteilen, daß die Transportkosten minimiert werden:

$$(38) \qquad \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{m} c_{ij}\, x_{ij} = \text{Minimum!}$$

Dabei sind Einschränkungen zu beachten.

Die Transportmittel können nur bis zu ihrer Kapazität belastet werden:

$$(39) \qquad \sum_{j=1}^{m} x_{ij} \leq a_i \qquad (i=1...n)$$

Die auf den Routen zu befördernden Mengen müssen transportiert werden:

$$(40) \qquad \sum_{i=1}^{n} x_{ij} = b_j \qquad (j=1...m)$$

Die einzelnen Transportmittel i dürfen nur einer Route zugeteilt werden, wenn sie mit einer Mindestmenge s_i belastet

werden (s. oben); diese kann für die Transportmittel unterschiedlich hoch sein:

$$x_{ij} \leq s_i \qquad (i=1...n) \tag{41}$$

Dieser Ansatz ist ein typischer Ansatz für eine Linearplanung. Typisch insofern, als die Kapazitätsschranken a_i bei einzelnen Transportmitteln immer gegeben sein können; denn die Mengen und Routen wechseln kurzfristig, und man wird sich nur einen durchschnittlich ausreichenden Bestand an Transportmitteln halten, so daß deren Kapazitätsschranken für verschiedene Transportpläne und -mengen verschieden relevant sind. Dann besteht auch immer das Zuordnungsproblem der Transportmittel auf die Routen, selbst wenn einzelne Transportmittel und die Gesamtkapazität aller Transportmittel unausgelastet sind.

Es wurde hier vorausgesetzt, daß die zu befahrenden Routen gegeben sind. Sie festzustellen aufgrund der bekannten Beförderungsmengen zwischen den Abteilungen, ist ein Problem für sich. Theoretisch stößt man auf einige Schwierigkeiten; denn die Zahl der möglichen Kombinationen von Orten zu einer Route, wobei Leerfahrten als Rückfahrt oder Zufahrt zu anderen Routen berücksichtigt werden müssen, ist sehr groß: Bei 10 Abteilungen gibt es allein schon (10-1)! = 9! = 362 880 mögliche Kombinationen zu einer Gesamtroute, die einmal alle Abteilungen berührt (Traveling-Salesman-Problem[73]), und außerdem eine entsprechende Zahl von Routen (Zyklen), die nur einzelne Abteilungen berühren. Vom Praktischen her gesehen hat es nur wenig Sinn, ein vollständiges Lösungsverfahren dafür anzugeben, denn die Zahl der offenbar sinnvollen Routen wird sehr viel kleiner sein, und es wird im allgemeinen möglich sein, aus der Anschauung heraus diese Routen auszuwählen. Für die zu trans-

---

73) Vgl. die Erörterung von Reihenfolgeproblemen S. 161 ff.

portierenden Mengen wird stets grundsätzlich ein Fluß in einer Richtung von den die Rohstoffe formenden zu den die Halbfertigfabrikate bearbeitenden und den die Fertigfabrikate montierenden Fertigungsabteilungen bestehen; wenn dieser natürlichen Reihenfolge im großen und ganzen auch die räumliche Anordnung der Abteilungen entspricht und die Wechselbeziehungen zwischen den Abteilungen gleicher Stufe nicht allzu kompliziert sind, dann ergeben sich somit auch die offensichtlich günstigen Transportrouten. Man wird sie auswählen auf Grund von Orts- und Wegeplänen, in welche man die durchschnittlich zu befördernden Mengen einträgt.

2.1432 Ein Mischungsproblem

Bei der Verarbeitung von Rohstoffen zu Ausgangsmaterialien für die höhere Produktion müssen oft bestimmte Rohstoffe gemischt und zusammen einem technologischen Prozeß unterworfen werden (Beispiele: Fast die gesamte Halbfabrikateproduktion in der chemischen Industrie, Produktion der Hüttenwerke). Die Rohstoffe (Erze, Koks, Kalk, um beim Beispiel der Erzverhüttung zu bleiben[74]), die in die Produkte (Roheisen) eingehen, können nun verschiedener Herkunft sein und entsprechend eine unterschiedliche Zusammensetzung des für das Produkt Wesentlichen (Metall- und Kohlenstoffgehalt) haben. Da das Produkt bestimmte Bestandteile mindestens haben muß und andere höchstens haben darf, und da die Rohstoffe verschiedener Provenienz auch verschiedene Kosten haben werden, stellt sich das Problem, die Rohstoffe so zu mischen, daß die kostenoptimalen Einsatzmengen verwendet werden und die Qualitätsbedingungen erfüllt bleiben. Präzisieren wir das am Beispiel der optimalen Beschickung eines Hochofens.

---

74) Auf dieses Beispiel weisen bereits kurz und ohne Formalisierung hin: Churchman, Ackoff, Arnoff: Introduction to Operations Research, New York 1957, pp. 385-386

Gegeben sind Erze E_i verschiedener Provenienzen $i = 1 \ldots n$. Diese Erze enthalten Metalle (z.B. Eisen, Mangan, Magnesium) in unterschiedlichen Mischungsverhältnissen. Der Anteil des Metalles j je Tonne Schmelze aus dem Erz i sei bezeichnet mit m_{ij}. Das produzierte Roheisen soll einige dieser Metalle in bestimmten Mischungsanteilen mindestens enthalten:

Erz	Anteil des Metalls M_i in der t Schmelze					Kosten je t Schmelze	Verfügbare Erzmenge
	M_1	M_2	...	M_j	... M_w		
E_1	m_{11}	m_{12}	...	m_{1j}	... m_{1w}	c_1	b_1
E_2	m_{21}	m_{22}	...	m_{2j}	... m_{2w}	c_2	b_2
E_3	.	.		.	.	c_3	b_3
.	.	.		.	.	.	.
.	.	.		.	.	.	.
.	.	.		.	.	.	.
E_i	m_{i1}	m_{i2}	...	m_{ij}	... m_{iw}	c_i	b_i
.	.	.		.	.	.	.
.	.	.		.	.	.	.
.	.	.		.	.	.	.
E_n	m_{n1}	m_{n2}	...	m_{nj}	... m_{nw}	c_n	b_n

(42) $M_j \geq a_j \qquad (j=1 \ldots r)$

die anderen Metalle dürfen höchstens im Roheisen enthalten sein mit einem Anteil:

(43) $M_j \leq a_j \qquad (j=r+1 \ldots w)$

Gemäß den Metallanteilen je t Schmelze aus den Erzen i lassen sich auch die erforderlichen Mengen für die Zuschlagstoffe Koks und Kalk ermitteln; daraus und aus den Einstandspreisen für die Erze ergeben sich dann die Kosten je t Schmelze aus dem Erz i, c_i.

Die Erze i werden in der Planungsperiode nicht beliebig lieferbar sein, sondern höchstens in der Menge b_i zur Verfügung stehen.

Der Hochofen kann für eine Schmelze k Tonnen Roheisen fassen.

Gesucht sind die kostenoptimalen Einsatzmengen x_i der Erze i; d.h. die Gesamtkosten sollen minimiert werden:

$$(44) \qquad C = \sum_{i=1}^{n} c_i \, x_i = \text{Minimum!}$$

unter folgenden Nebenbedingungen:

Die Einsatzmengen x_i können die verfügbaren Mengen b_i nicht überschreiten:

$$(45) \qquad 0 \leq x_i \leq b_i \qquad (i=1...n).$$

Die Anteile der Metalle in der Schmelze müssen den gegebenen Qualitätsanforderungen (42) und (43) entsprechen:

$$(46) \qquad \sum_{i=1}^{n} x_i \, m_{ij} \geq a_{ji} \sum_{i=1}^{n} x_i \qquad (j=1...r)$$

bzw.

$$(47) \qquad \sum_{i=1}^{n} x_i \, m_{ij} \leq a_{ji} \sum_{i=1}^{n} x_i \qquad (j=r+1...w).$$

Die Gesamteinsatzmenge soll gleich dem Fassungsvermögen des Hochofens sein:

$$(48) \qquad \sum_{i=1}^{n} x_i = k.$$

Dieses Zuordnungsproblem ist ein bei einer entsprechend gegebenen Verfahrenstechnik ständig bestehendes Planungsproblem. Denn die geforderten Mengenanteile in den Produkten können je nach dem Weiter-Verwendungszweck unterschiedlich sein, und die Preise für die Input-Rohstoffe können schwanken, so daß die kostenoptimale Einsatzmengenkombination jeweils neu ermittelt werden

muß, selbst wenn die Mengenbeschränkung (45) nicht und statt dessen nur die Mindestproduktionsmenge gegeben ist (48).

2.15 Zusammenfassung

Eine Reihe von Produktionsplanungsaufgaben besteht aus Zuordnungsproblemen, bestimmte Mengen oder Produkte sollen bestimmten Kapazitäten, Zeiträumen oder Verfahren so zugeordnet werden, daß bestimmte Zielsetzungen erfüllt werden. Es wurde gezeigt, daß diese Probleme von der traditionellen Produktionstheorie nicht oder anders behandelt wurden, als es durch einen linearen Planungsansatz geschehen kann, wie er kurz skizziert ist, und es wurden Gründe angeführt, die - bei gegebenen Voraussetzungen - für die Grundlagen des linearen Planungsansatzes sprechen und die den Inhalt des Ertragsgesetzes unmittelbar berühren. Ist die Gültigkeit des Ertragsgesetzes vorauszusetzen, so müssen Weiterungen, etwa ein linearisierter konvexer Planungsansatz, verwendet werden. Es erwies sich als zweckmäßig, das Ertragsgesetz allgemeiner zu sehen und auch mengenabhängig steigende Preise (Kosten) der Einsatzfaktoren bei gleichen Produktionskoeffizienten unter den Begriff des Ertragsgesetzes zu subsumieren. Für typische betriebliche Zuordnungsprobleme, die Produktionsglättung, die Entscheidung über das Ausmaß Eigenfertigung - Fremdbezug und für die Zuordnung von Produkten auf Kapazitäten (Verfahren) wurden einfache lineare Planungsansätze formuliert, und es wurde auf mögliche methodische Erweiterungen hingewiesen.

Der Unterabschnitt 2.142 sollte zugleich zeigen, daß der lineare Planungsansatz im Grunde ein Problem behandelt, das die Betriebswirtschaftslehre leicht nur speziell sieht: Das Problem

der verbundenen Produktion. Hierunter fällt nicht nur die (fertigungstechnisch zwangsläufige) Kuppelproduktion, sondern auch die ökonomisch verbundene Produktion, die im Mehrproduktenbetrieb dadurch entsteht, daß die gleichen (kurz- und mittelfristig stets knappen) Produktionsfaktoren für mehrere Produkte in Frage kommen (d.h. die Produkte um die Faktoren "konkurrieren"). Nur eine Planungsrechnung, die simultan alle Produkte und Kapazitäten betrachtet, kann eine optimale Produkt- und Verfahrenskombination ermitteln. Diese simultane Betrachtung mehrerer möglicher Aktivitäten und Einsatzfaktoren ist in den bekannten Kostenrechnungsverfahren, auch soweit sie planungs- und zukunftsorientiert sind, nicht enthalten. Sie setzen im Prinzip ein konstantes Product-Mixed voraus.

2.2 Teile-Einsatzplanung

Der Komplex der oben erörterten Zuordnungsprobleme beschränkt sich im Grunde genommen in seinem Inhalt auf die Mehrproduktenfertigung einer Stufe, also auf eine Art horizontale Betrachtung; die Zeit- und Reihenfolgeprobleme, die durch Mehrstufenfertigung entstehen, werden durch deren Ansätze nicht erfaßt. Die Planung der Produktionsreihenfolge und der Termine und damit auch der Zwischenlager, also eine Art vertikale Betrachtung, ist aber bei der ökonomisch verbundenen Produktion, die zumeist in mehreren Stufen vor sich geht, ebenso wichtig wie die Zuordnung der zu produzierenden Produkte auf Maschinen, Verfahren und allgemein Produktionsfaktoren. Auf diese Probleme soll daher später im Abschnitt "Ablaufplanung" eingegangen werden. Zunächst soll ein Problem näher betrachtet werden, das in gleicher Weise der Mehrproduktenfertigung und der Mehrstufenfertigung angehört und bei dem die vertikale Betrachtungsweise von der horizontalen nicht getrennt werden kann: die Teile-Einsatzplanung.

2.21 Problemstellung

Die Produkte eines Betriebes sind oft in der Weise miteinander verflochten, daß bestimmte Rohstoffe, Halbfabrikate oder Gruppen von Halbfabrikaten Einsatzgut für mehrere andere Zwischen-Produkte und Endprodukte sind. In Wirtschaftszweigen wie Elektroindustrie, Kraftfahrzeugbau, Chemie, Maschinenbau u.a. ist diese Art der Fertigung, bei der aus z.T. einheitlichen Halbfabrikaten unterschiedliche Endprodukte zusammengesetzt werden, gang und gäbe. Sie wird bewußt auch angestrebt (u.a. durch innerbetriebliche Normen und Typen), um die Zahl der zu fertigenden Teile zu begrenzen und so zu höheren Stückzahlen bei

den Teilen zu kommen; außerdem wird durch die Standardisierung der Einsatzteile die Konstrukteur-Arbeit vereinfacht und die Ersatzteilhaltung und das Reparaturwesen z.T. überhaupt erst ermöglicht. Bei einer solchen Verflochtenheit der Produkte gilt es dann, für einen Absatzplan, für den die Menge der Endprodukte bekannt ist, aus den Konstruktionsstücklisten den Gesamtbedarf an den Einsatzteilen mengenmäßig zu ermitteln und zeitlich zu planen.

Worin liegt hier eine Planungsaufgabe? Wie löst man die Teile-Einsatzplanung bisher? Die für den verflochtenen Teileeinsatz erforderliche Stücklistenzusammenfassung und Arbeitsvorbereitung ist unproblematisch, wenn sie nur für einen, eine längere Periode umfassenden Absatzplan gemacht werden muß. Es brauchen im Prinzip nur die gleichen in den Stücklisten vorkommenden Teile addiert und die Produktionstermine dafür festgelegt zu werden. Die Teile-Einsatzplanung wird erst zum Problem, wenn die Zahl der Endprodukte und Teile verschiedener Bearbeitungsstufen so groß und die Verflechtungen zwischen den Teilen so kompliziert sind, daß die Arbeitsvorbereitung in Bezug auf Mengen und Termine nicht mehr in befriedigender Zeit manuell bewältigt werden kann. Die manuelle Zusammenstellung der Stücklisten versagt vollends, wenn die Zusammensetzung des Absatzplanes sich häufig ändert (Neuaufträge, Umbestellungen auf andere Typen, Stornierungen), so daß die Teilebedarfsanforderung jeweils neu und möglichst kurzfristig dem neuen Absatzplan angepaßt werden muß. Das ist aber in den Betrieben, bei denen Verflechtungen im Teile-Einsatz eine große Rolle spielen, zumeist der Fall. Bisher hilft man sich damit, daß man die Halbfabrikate ähnlich wie die Fertigfabrikate "disponiert", d.h. man schätzt den zukünftigen Teilebedarf, ohne auf den Absatzplan für die Fertigfabrikate und seine Zusammensetzung direkt und rechenhaft Bezug zu nehmen. Da in eine derartige Teile"disposition" sowohl die Unsicherheit des Absatzes der Endprodukt-

te als auch die Unsicherheit in der Zusammensetzung des Absatzes eingehen, führt sie notwendigerweise zu Fehlern, die sich teilweise in zu hohen Zwischenlagern, teilweise in Mangel an bestimmten Teilen auswirken können, so daß entweder erhöhte Lagerkosten oder zusätzliche Kosten für das nachträgliche und kurzfristige Durchziehen von internen Nachbestellungen und für Stillstandzeiten der termingerecht fertigen Produktion entstehen. Dieser durch die Absatzunsicherheiten nicht gegebene Fehler in der Teiledispositon kann nur vermieden werden, wenn die Teiledisposition durch ein rechnerisches Kalkül, das auf den Stücklisten basiert, schnell erledigt werden kann.

Da in zunehmendem Maße den Betrieben elektronische Rechenmaschinen zur Verfügung stehen und da diese gerade für die rasche Verarbeitung großer Zahlenmengen mit einem im Grunde einfachen Kalkül geeignet sind, lohnt es sich, das - theoretisch einfache und unergiebige, aber praktisch recht bedeutsame - Teile-Einsatz-Problem allgemein zu beleuchten und zu prüfen, wie weit es der Bearbeitung durch einen Rechner zugänglich gemacht werden kann.

Das Problem des verflochtenen Teile-Einsatzes ist bei Z. Gozinto[75] und A. Vaszonyi[76], in deutscher Sprache bei W. Wetzel[77] behandelt worden. Die Frage des Rechenkalküls zur Ermittlung des Gesamtteilebedarfs ist dort beantwortet worden, so daß wir uns hier im wesentlichen auf eine kurze Wiedergabe der Erkenntnisse dort beschränken können. Dagegen sind die Fragen der Terminplanung bisher nur gestreift worden; auf sie wollen wir daher unser besonderes Augenmerk lenken.

---

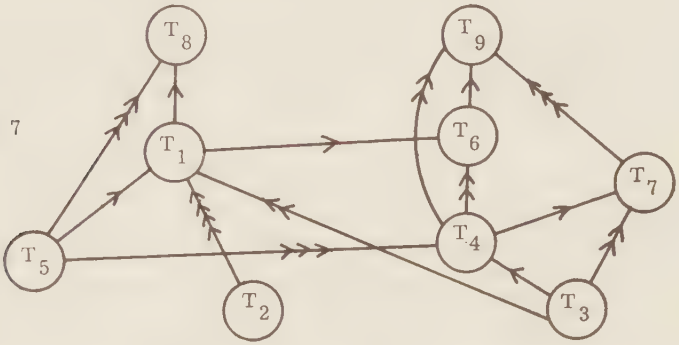
75) Z. Gozinto: Collected Works, Vol. 3 (zitiert nach A. Vaszonyi, a.a.O., p. 429)

76) A. Vaszonyi: Scientific Programming in Business and Industry, New York 1958, pp. 429-452

2.22 Ermittlung des Gesamt-Teilebedarfs

Das Teile-Einsatz-Problem läßt sich am Beispiel graphisch erläutern. Betrachte: w... die folgende Übersicht (Gozinto-Graphik, Figur 7) (entnommen von Wetzel[77], S. 127):

Figur 7



"Um ein Teil Nr. 9 (T_9) zu produzieren, sind 2 Stücke von T_4, eines von T_6 und 3 Mengeneinheiten von T_7 erforderlich; um aber T_7 zu fertigen, werden 2 T_3 und 1 T_4 benötigt"... usw.[78]

Man erkennt, daß es für einen gegebenen Absatzplan für die Endprodukte T_8 und T_9 und gegebenenfalls auch für die Zwischenprodukte einiger Additionen und Multiplikationen bedarf, um den Gesamtbedarf an Teilen zu ermitteln. Man kann den Teile-Einsatz-Sachverhalt statt in einer Graphik in einer Matrix darstellen:

---

77) W. Wetzel: "Bemerkungen zur Rationalisierung betriebswirtschaftlicher Entscheidungen mit Hilfe elektronischer Datenverarbeitungsmaschinen", Unternehmensforschung, Bd. 1 (1956/57), S. 123-133

78) W. Wetzel: "Bemerkungen zur...", a.a.O., S. 127

Im Beispiel:

eingesetzte Teile i	Erzeugte Teile Nr. j								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1						1		1	
2	4								
3	2			1			2		
4						2	1		2
5	1			3				3	
6									1
7									3
8									
9									

allgemein:

(49)
$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \cdots a_{1m} \\ a_{21} & a_{22} \cdots a_{2m} \\ \vdots & \\ a_{i1} \cdots a_{ij} \cdots a_{im} \\ \vdots & \\ a_{m1} \cdots a_{mj} \cdots a_{mm} \end{pmatrix} = \mathcal{A}$$

$\mathcal{A}$ ist also durch die technische Konstruktion der Teile gegebene Stücklistenmatrix, deren Elemente a_{ij} angeben, welche Mengen des Teiles i direkt gebraucht werden, um ein Teil j herzustellen (Pfeilspitzen in der Graphik).

Aus dieser Matrix müssen die insgesamt erforderlichen Teile errechnet werden. Die Gesamtzahl der Teile Nr. i, die für die Produktion eines Teiles j gebraucht werden, ergibt sich nach folgender Gleichung[79]:

---

79) vgl. A. Vaszonyi: "The Use of Mathematics in Production and Inventory Control I", Management Science, Vol. 1 (1954), p. 70 - 85, hier p. 77

		Zahl der Teile der Nr. i, T_i, die direkt in T_1 eingehen	x	Gesamtzahl der T_i, die für das T_j erforderlich sind
	+			
		Zahl der T_i, die direkt in T_2 eingehen	x	Gesamtzahl der T_2, die für das T_j erforderlich sind
	+			
Gesamtzahl der T_i, die für ein T_j = erforderlich sind		Zahl der T_i, die direkt in T_3 eingehen	x	Gesamtzahl der T_3, die für das T_j erforderlich sind
	+			
		.		
		.		
		.		
	+			
		Zahl der T_i, die direkt in T_m eingehen		Gesamtzahl der T_m, die für das T_j erforderlich sind

Bezeichnet man mit b_{ij} den Gesamtbedarf an den Teilen der Nr. i, T_i, die für die Herstellung eines Teiles T_j erforderlich sind, so kann der Ausdruck oben geschrieben werden:

$$(50) \quad b_{ij} = a_{i1}\, b_{1j} + a_{i2}\, b_{2j} + a_{i3}\, b_{3j} + \ldots + a_{ik}\, b_{kj} + \ldots + a_{im}\, b_{mj}$$

oder allgemein

$$(51) \quad b_{ij} = \sum_{k=1}^{m} a_{ik}\, b_{kj} \qquad i=1\ldots m \quad j=1\ldots m \text{ für } i \neq j$$

$$(52) \quad b_{ii} = 1 \qquad i=1\ldots m \text{ für } i = j$$

Die b_{ij} sind die gesuchten Elemente der Gesamtteilebedarfsmatrix $\mathfrak{B}$. Nun bietet es sich an, die Gleichungen (51) und (52) in Matrizenschreibweise zu übertragen und aufzulösen. Denn die Gleichungen (51) und (52) bedeuten offenbar mit anderen Worten: Matrix $\mathfrak{A}$ und $\mathfrak{B}$ müssen multipliziert werden in der üblichen Weise, daß die Elemente einer Zeile der Matrix $\mathfrak{A}$ mit den entsprechenden

Elementen der entsprechenden Spalte der Matrix $\mathfrak{Y}$ multipliziert und diese Einzelergebnisse addiert werden. Vaszonyi und Wetzel schreiben daher ohne Kommentar für (51) und (52) zusammen:

(53) $$\mathfrak{Y} = \mathfrak{A} \cdot \mathfrak{Y} + \mathfrak{E}$$

oder

(54) $$\mathfrak{Y} = (\mathfrak{E} - \mathfrak{A})^{-1}$$

wobei $\mathfrak{E}$ die Einheitsmatrix darstellt (Elemente der Hauptdiagonalen = 1, alle übrigen Elemente = O, vgl. (52)).

Dieser Schluß von (51) und (52) auf (53) ist aber nicht allgemein gültig, sondern nur aus der Struktur des Problems hier zu erklären und nur für das gegebene Problem zulässig. Das Teile-Einsatzproblem ist nämlich durch folgende Eigenschaft ausgezeichnet, auf die explizit hinzuweisen offenbar von Erkenntniswert ist: Die Teile lassen sich gruppieren in solche Teile, die nur Einsatzgut (z. B. Rohstoff oder fremdbezogenes Halbfabrikat) sind (im Beispiel die Teile 5, 2 und 3), solche, zu deren Herstellung es nur Teile der ersten Gruppe bedarf (im Beispiel Teile 1 und 4) und so fort, die letzte Gruppe sind Teile, die nicht mehr Einsatzgut, sondern Endprodukt sind (im Beispiel die Teile 8 und 9). Eine solche Gruppierung ist nur dann nicht möglich, wenn "höher" montierte Teile wiederum Einsatzgut für die eigenen "niederen" Teile sind; dieser Fall ist aber technisch nur schwer vorstellbar (Ausnahmen gibt es vielleicht im Bereich der chemischen Industrie). Die Gruppierung der Teile nach "Einsatzstufen" führt zu Dreiecksmatrizen, die rechnerisch besonders geringen Aufwand erfordern. Denn sie bedeutet, daß bei $i \geq j$ a_{ij} in der Stücklistenmatrix = O ist, so daß die eine durch die Hauptdiagonale abgeteilte Hälfte der Matrix aus lauter O-Elementen besteht. Dadurch ist es möglich, die Gesamtteilebedarfsmatrix fortlaufend, beginnend mit den

"niederen" Teilen, unter Benutzung der schon bekannten b_{ij} gemäß Gleichung (50 bzw. 53) zu errechnen, und vor allem wird dadurch eine geordnete Terminrückrechnung, beginnend mit den Endteilen, ermöglicht, wie weiter unten ausgeführt ist.

Diese Ordnung, die dem Problem immanent ist, gestattet es, Gleichung (53) und (54) aus (51) und (52) zu schließen. Wäre sie nicht, so müßte man für (51) eine Matrix $\mathfrak{b}^*$ aufstellen, deren Hauptdiagonale aus O-Elementen besteht, und man müßte schreiben:

(54a) $$\mathfrak{b} = \mathfrak{A} \cdot \mathfrak{b}^* + \mathfrak{E}$$

wobei

(54b) $$\mathfrak{b} = \mathfrak{b}^* + \mathfrak{E}$$

Setzt man ein und löst dann auf, so ergäbe sich:

(54c) $$\mathfrak{b} = \mathfrak{A} \cdot \mathfrak{b} - \mathfrak{A} \cdot \mathfrak{E} + \mathfrak{E}$$

oder

(54d) $$\mathfrak{b}(\mathfrak{E} - \mathfrak{A}) = \mathfrak{E}(\mathfrak{E} - \mathfrak{A})$$

d.h.

(54e) $$\mathfrak{b} = \mathfrak{E}$$

ein offenbar unsinniges Ergebnis, das darauf hinweist, daß eine Lösung nur möglich ist, wenn die Matrizen $\mathfrak{A}$ und $\mathfrak{b}^*$ Nullteiler sind, d.h. Matrizen, die einzeln durchaus positive (oder auch negative) Elemente enthalten, aber multipliziert eine Null-Matrix ergeben, so daß mit ihnen nicht gerechnet werden kann. Allgemein kann also Gleichung (54a) nicht aufgestellt werden. Nur für den gegebenen Spezialfall, daß $\mathfrak{A}$ und $\mathfrak{b}$ obere Dreiecksmatrizen sind und die Hauptdiagonale von $\mathfrak{A}$ aus Null-Elementen besteht, darf statt $\mathfrak{b}^*$ $\mathfrak{b}$ geschrieben (53) werden, weil die Multiplikation dann zum gleichen Ergebnis führt. Daß das Problem nur für den hier gegebenen Spezialfall lösbar ist, ist logisch auch leicht einzusehen: In Gleichung (51) stehen auch auf der rechten Seite Elemente der Matrix $\mathfrak{b}$; nur wenn

diese eine Dreiecksmatrix ist, findet sich ein erstes Element b_{ij}, mit dessen Hilfe eine Gleichung (51) erfüllt werden kann zur Errechnung eines zweiten Elements b_{ij} und so fort; im anderen Fall stünden auch auf der rechten Seite stets unbekannte b_{ij}.

Für diesen Rechenvorgang ist es an sich gleichgültig, ob man die Ordnung nach Einsatzstufen vornimmt und gemäß Gleichung (51) den Gesamtteilebedarf errechnet, oder ob man die Inversion der ungeordneten, wegen der immanenten Ordnung in jedem Falle invertierbaren Matrizen gemäß Gleichung (54) vornimmt[80]. Die Matrizeninversion ist bei Vorhandensein eines Elektronenrechners im allgemeinen schon programmiert, dauert aber nicht unwesentlich länger als die einfache Multiplikation nach (51); dafür setzt diese die fertige Ordnung nach Einsatzstufen voraus. Wegen der Terminrückrechnung ist, wie gezeigt werden wird, die Ordnung nach Einsatzstufen unbedingt besser und vorzuziehen.

Im Beispiel wird, wenn man nach Einsatzstufen ordnet, die Matrix $\mathcal{A}$:

$\mathcal{A}$ = (eingesetzte Teile i / erzeugte Teile j)

i \ j	2	3	5	1	4	8	7	6	9
2	O	O		4					
3	O	O		2	1		2		
5			O	1	3	3			
1				O		1		1	
4					O		1	2	2
8						O			
7							O		3
6								O	1
9	O								O

80) Zur Methodik der Matrizenrechnung vgl. A. Klingst: "Einführung in die Matrizenrechnung", in: Anwendungen der Matrizenrechnung auf wirtschaftliche und statistische Probleme, Würzburg 1959, S. 33-38; und H. Scholz: "Praktische Lösung von Aufgaben der Matrizenrechnung", ebenda S. 235 ff.

Die Matrix des Gesamtteilebedarfs $\mathfrak{Y}$ errechnet sich ohne Schwierigkeit nach den Gleichungen (51) und (52):

$\mathfrak{Y}$ = eingesetzte Teile i

	erzeugte Teile j								
	2	3	5	1	4	8	7	6	9
2	1			4		4		4	4
3		1		2	1	2	3	4	15
5			1	1	3	4	3	7	22
1				1		1		1	1
4					1		1	2	7
8						1			
7							1		3
6								1	1
9									1

Jedes Element b_{ij} gibt also an, wieviel Teile von i insgesamt erforderlich sind, um ein Teil j herzustellen. Für ein beliebig gegebenes Absatzprogramm lassen sich daraus die insgesamt erforderlichen Teile-Mengen ermitteln. Bezeichnet man mit v_j den Absatzplan für das Gut j, so ergibt sich als erforderliche Produktion des Teiles i für die Herstellung der gewünschten Teilmenge von Gut j:

$$p_i = b_{ij} v_j. \tag{55}$$

Der insgesamt aufzustellende Produktionsplan für die Teile i ist dann die Summe über die Absatzpläne der Güter j:

$$p_i = \sum_{j=1}^{m} b_{ij} v_j \qquad (i=1...m) \tag{56}$$

Damit ist das Problem der Mengenberechnung bei verflochtenem Teileeinsatz gelöst. Aus den Stücklisten der Konstruktionszeichnungen kennt man den einzelnen Teilebedarf und somit die Elemente a_{ij} der Stücklistenmatrix $\mathfrak{A}$. Aus der Matrix $\mathfrak{A}$

ergibt sich nach den Gleichungen (52) und (53) der Gesamtteilebedarf b_{ij} in der Matrix $\mathfrak{V}$. Für einen gegebenen Absatzplan v_j (j=1...m) läßt sich daraus nach (56) der mengenmäßige Produktionsplan für die Einzelteile ermitteln.

Die Matrix $\mathfrak{V}$ muß nur einmal errechnet werden; eine Neuberechnung wird erst erforderlich, wenn sich die technische Konstruktion und somit die direkten Teile-Einsätze a_{ij} geändert haben. Dagegen werden die Absatzmengen v_j sich laufend und kurzfristig ändern. Die Auswirkung von Änderungen in den Absatzmengen (z.B. durch Stornierungen, Vorziehen besonders eiliger Aufträge, Umbestellungen auf andere Ausführungen der Güter u.ä.) auf den laufenden Produktionsplan kurzfristig und exakt festzustellen ist in erster Linie der Sinn der Teile-Bedarfs-Rechnung. Ist die Verschachtelung des Teileeinsatzes sehr stark und handelt es sich um sehr viele Einsatzgüter und -teile, so ist die Rechnung nach Gleichung (56) nur durch speicherfähige Elektronenrechner in befriedigender Zeit möglich. Man wird dann im allgemeinen die Gesamt-Teilebedarfszahlen b_{ij} der Matrix $\mathfrak{V}$ ständig speichern (oder schnell eingabefähig halten) und nur die Absatzplan-Mengen v_j neu eingeben. Der Vorteil der exakten Mengenbedarfsrechnung dürfte vor allem in zwei betrieblichen Tatbeständen deutlich werden: Die Zwischenlagerungen werden vermindert, und die Fertigungszeiten werden weniger gestört durch kurzfristig fehlende Teile, wie es der Fall ist, wenn man bei stark verflochtener Teilefertigung, weil man der Zahlenmengen anders nicht Herr wird, mit Durchschnittswerten und Teilebedarfsschätzungen "disponiert" (d.h. wie bei den Endprodukten auch für die Halbfabrikate eine definitive Bedarfsprognose macht). Durch die richtige Teilebedarfsermittlung wird zudem grundsätzlich die Errechnung optimaler Losgrößen möglich, was über die Ersparnis der zusätzlichen Kosten für Zwischenlager und Unordnung im

Fertigungsfluß hinaus dazu führt, daß die Fertigungskosten gesenkt werden können und daß die Termindisposition auf exakten Unterlagen aufbauen kann und die Termine sicherer werden (s.a. weiter unten).

In Parenthese sei angemerkt, daß die Teile-Einsatz-Rechnung gekoppelt sein kann mit einer "automatisierten Konstruktion" der Enderzeugnisse. Manche Erzeugnisse (namentlich in der Elektroindustrie) werden lediglich aus einer Auswahl von gegebenen Halbfabrikaten zusammengesetzt; welche Teile für bestimmte Aufträge in Frage kommen, richtet sich oft nur nach gewissen Größen der Dimensionierung und nach bestimmten gewünschten technischen Funktionen, liegt aber in der Art der Technik fest. Wenn es sich in den Zahlenmengen und wegen häufiger Wiederholungen lohnt, so läßt sich dieser Teil der Konstrukteur-Arbeit auch von einer Rechenanlage ausführen; denn in ihren technischen Funktionen fest gegebene Teile so zusammensetzen, daß das Fertigprodukt bestimmte Eigenschaften hat, ist ja keine schöpferische Denk- und Kombinationstätigkeit mehr, sondern lediglich ein Auswählen und Rechnen unter Bekanntem für den bestimmten Zweck. Das Programm muß das Rechenkalkül für die Auswahl der Teile nach Dimensionierungsgesichtspunkten und Funktionen enthalten; gespeichert werden müssen die technischen Daten der Teile und ihre Funktionen und eventuell irgendwelche Kostengrößen für die Teile, damit bei alternativen technischen Möglichkeiten die kostengünstigste ausgewählt werden kann. Über eine derartige automatisierte Konstruktion von Großtransformatoren wird in "Bürotechnik und Automation" (1. Jg. 1960, Heft 2, S. 52) berichtet. Bei einer solchen technischen Auftragsberechnung kann zugleich die Teilebedarfsrechnung insgesamt wie oben angestellt werden.

2.23 Terminplanung für die Teile-Einsatzplanung

Die Mengenberechnung für den Teile-Einsatz ist unvollständig, wenn sie nicht auch mit einer Terminplanung verbunden wird; denn die insgesamt erforderlichen Teile werden nicht zu gleicher Zeit, sondern auf verschiedene Zeitpunkte verteilt gebraucht. Aus der Gozinto-Graphik für das Zahlenbeispiel zeigt sich z.B. ohne weiteres, daß für die Produktion eines Teiles 9 von den Teilen 4 die Teile, die in T_6 eingehen, eher gebraucht werden, als die Teile, die direkt in 9 eingehen. Würde man die Einsatz-Teile immer dann insgesamt produzieren, wenn die ersten Teile davon gebraucht werden, so würden u.U. nicht unerhebliche Zwischenlager mit ihren Kosten entstehen, und es könnte zu Disproportionalitäten im Produktionsablauf kommen, weil zu Beginn des Gesamt-Produktionsprozesses sich die Fertigung der "niederen" Teile häufen würde, gegen Ende des Produktionsprozesses dagegen nur noch "höhere" Teile zu produzieren wären. Ob sich hier ein Ausgleich durch die fortlaufende Verzahnung der Aufträge ohne weiteres ergibt, ist nicht sicher. Aber auch in diesem Falle bliebe das Zwischenlagerproblem bestehen.

Vaszonyi[81)] entwickelt ein Modell für eine Terminplanung, in dem er aus den bekannten Produktionszeiten für die einzelnen Teile eine "Setback-Matrix" ermittelt, die - analog wie für den Gesamtteilebedarf die Matrix $\mathfrak{L}$ - für jedes zu produzierende Teil angibt, um wieviel Zeiteinheiten früher die Einsatzteile produziert werden müssen. Er vernachlässigt dabei das Zwischenlagerproblem, denn die in einer solchen Matrix angegebenen Zeiten müssen die Maximalzeiten sein, also die Zeiten,

81) A. Vaszonyi: Scientific Programming ..., a.a.O., pp. 439 und "The Use of Mathematics in Production and Inventory Control II", Management Science, Vol. 1 (1955), pp. 207-223

die für die ersten Stücke der jeweiligen Einsatzteile erforderlich sind. Über die zeitliche Verteilung des Bedarfs an den Einsatzteilen für bestimmte End-Teile sagt das Modell von Vaszonyi also nichts aus; gerade diese interessiert aber, weil sie sich bei einer Änderung der Ausstoßmengen oder der Zusammensetzung der Aufträge an End-Teilen besonders stark verändern kann.

Nur führt (und das ist für Vaszonyi der Grund für die einschneidende Vereinfachung) eine exakte Terminplanung beim verflochtenen Teile-Einsatz zu einer sehr großen Zahlenmenge[82], wie an dem Zahlenbeispiel im vorigen Abschnitt erläutert werden kann:

Der Absatzplan sehe die Produktion von v_9 Teilen 9 zum Zeitpunkt Z_9, bezeichnet mit $v_9(Z_9)$, und von v_8 Teilen 8 zum Zeitpunkt Z_8, bezeichnet mit $v_8(Z_8)$, vor. Die Produktionszeit (einschließlich Schwankungssicherheit und Transportzeiten) t_j sei für jedes Teil bekannt. Damit die Teile 9 zum Zeitpunkt Z_9 fertiggestellt sind, müssen die direkten Einsatzteile dafür zum Zeitpunkt Z_9-t_9, nämlich um die Produktionszeit der Teile 9 eher zur Verfügung stehen. Nach der Matrix $\mathcal{A}$ sind dieses:

2 Teile 4 3 Teile 7 1 Teil 6

d.h.

$$(57) \qquad v_9(Z_9) = 2v_9\, T_4(Z_9-t_9) + 3v_9\, T_7(Z_9-t_9) + v_9\, T_6(Z_9-t_9)$$

Für die gewünschten v Teile 8 gilt entsprechend:

$$(58) \qquad v_8(Z_8) = v_8\, T_1(Z_8-t_8) + 3v_8\, T_5(Z_8-t_8)$$

Für die direkten Einsatzteile der beiden Produkte 8 und 9 ihrerseits ergibt sich in gleicher Weise der Teilebedarf. (Hierbei

---

82) Auch W. Wetzel ("Bemerkungen zur...", a.a.O., S. 127) eleminiert daher das Zeitproblem aus seinen Erörterungen und verweist auf das bisher übliche Schätzverfahren, indem er schreibt: es "... werden (bei einer geplanten Änderung

ist wiederum die Anordnung der Teile nach Einsatzstufen von Vorteil; geht man fortlaufend von den "höheren" Teilen zu den "niederen", so ordnen sich die Gleichungen und ihre Glieder von selbst nach Teilen und ungefähr nach Terminen). In Gleichung (57) kann also gemäß Matrix $\mathcal{C}$ $v_9\ T_6(Z_9-t_9)$ aufgelöst werden in:

(59) $v_9\ T_6(Z_9-t_9) = 2v_9\ T_4(Z_9-t_9-t_6) + v_9\ T_1(Z_9-t_9-t_6)$

Ebenso:

(60) $3v_9\ T_7(Z_9-t_9) = 3v_9\ T_4(Z_9-t_9-t_7) + 6v_9\ T_3(Z_9-t_9-t_4)$

und

(61) $2v_9\ T_4(Z_9-t_9) = 2v_9\ T_3(Z_9-t_9-t_4) + 6v_9\ T_5(Z_9-t_9-t_4)$

Auch in Gleichung (59) und (60) ist ein Glied mit T_4, also:

(62) $2v_9\ T_4(Z_9-t_9-t_6) = 2v_9\ T_3(Z_9-t_9-t_6-t_4)+6v_9\ T_5(Z_9-t_9-t_6-t_4)$

(63) $3v_9\ T_4(Z_9-t_9-t_7) = 3v_9\ T_3(Z_9-t_9-t_7-t_4)+9v_9\ T_5(Z_9-t_9-t_7-t_4)$

Der Teile-Einsatz in die Teile 1 (Gleichungen (58) und (59)) ist:

(64) $v_8T_1(Z_8-t_8) = 4v_8T_2(Z_8-t_8-t_1)+2v_8T_3(Z_8-t_8-t_1)+v_8T_5(Z_8-t_8-t_1)$

(65) $v_9T_1(Z_9-t_9-t_6) = 4v_9T_2(Z_9-t_9-t_6-t_1)+2v_9T_3(Z_9-t_9-t_6-t_1) + v_9T_5(Z_9-t_9-t_6-t_1)$

Damit liegen für alle Teile die Produktionstermine fest. Beispielsweise werden von den Teilen 5, von denen nach der Matrix $\mathcal{D}$ insges. 26 Stück gebraucht werden, wenn 1 Teil 8 und 1 Teil 9 hergestellt werden sollen,

---

Forts.:

82) W. Wetzel: ..., der Ausstoßmengen) die Sachzusammenhänge so unübersichtlich, daß die betreffenden Bearbeiter nur noch mit 'Erfahrungswerten' operieren können".

nach Gleichung (58) 3 Stück zum Termin $Z_8 - t_8$
" " (61) 6 " " $Z_9 - t_9 - t_4$
" " (62) 6 " " $Z_9 - t_9 - t_6 - t_4$
" " (63) 9 " " $Z_9 - t_9 - t_7 - t_4$
" " (64) 1 " " $Z_8 - t_8 - t_1$
" " (65) 1 " " $Z_9 - t_9 - t_6 - t_1$ gebraucht.

Für die anderen Teile läßt sich die zeitliche Verteilung des Bedarfs in gleicher Weise aus den Gleichungen (57) bis (65) übersichtlich darstellen. Man erkennt, daß bei starker Verzahnung des Teile-Einsatzes die fortlaufende Berechnung der erforderlichen Termine nach der Beziehung

$$(66) \qquad {}_{v_K}T_j(Z) = \sum_{i=1}^{m} a_{ij}\, {}_{v_K}T_i(Z-t_j) \qquad \begin{matrix}(j=1\ldots m)\\(K=k\ldots m)\end{matrix}$$

wobei:

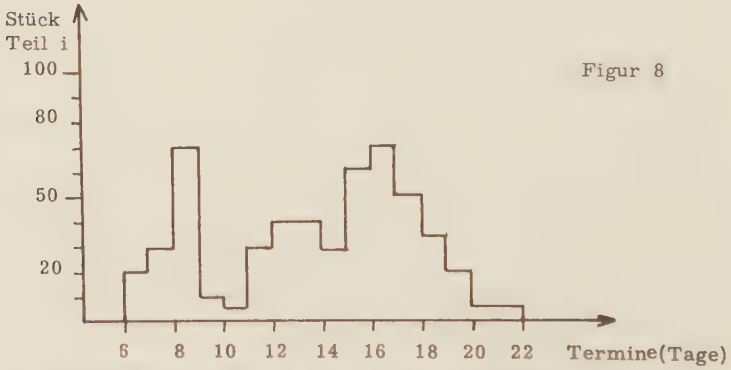
${}_{v_K}T_j(Z)$ = zu erzeugendes Teil j in der Menge v_K zum Termin Z

a_{ij} = direkter Teileeinsatz von Teilen i in das Teil j

t_j = Produktionszeit eines Teiles j aus den direkten Einsatzteilen T_i

für jedes Teil eine (lange) Liste von Terminen sich ergibt und für jeden Termin eines Teiles weiter zurückgerechnet werden muß, so daß der Zahlenumfang auf dem Weg von den "höheren" zu den "niederen" Teilen hin lawinenartig zunimmt. Die Speicherfähigkeit auch großer Rechenanlagen könnte schließlich erschöpft werden oder die Ausgabe aus dem Rechner könnte so lange dauern und unübersichtlich werden, daß der Vorteil der raschen Neuberechnung des Produktionsplanes bei einer Änderung der Absatzplandaten wieder zunichte gemacht würde. Der exakten Terminberechnung stehen also in der praktischen Durchführung Schwierigkeiten und Grenzen im Wege.

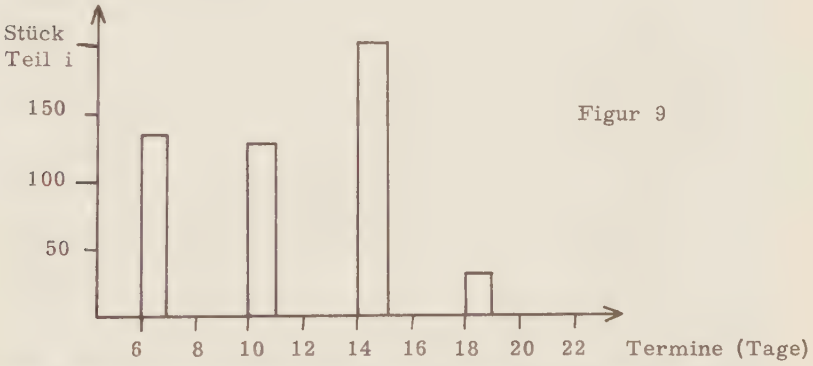
Hier bietet sich eine brauchbare Näherung an. Selbst wenn die Aufstellung des exakten Terminplanes keinerlei Schwierigkeiten machte, würde man den Produktionsplan doch nicht so aufstellen, daß die Termine und Stückzahlen genau so, wie berechnet, vorgesehen sind, sondern man würde die terminlich nahe beieinanderliegenden Stückzahlen zusammenfassen in Lose sinnvoller (optimaler) Größe; es entstünden dann zwar wiederum kleinere Zwischenlager, aber deren Kosten würden durch den Losgrößeneffekt kompensiert werden. Die Terminplanung braucht nun nur so genau wie die Produktionsplanung und -eingabe selbst zu sein. Es bedeutet also keinen Verlust, wenn man für jedes Teil Terminklassen bildet, denen die zunächst terminlich genau errechneten Stückzahlen zugeordnet werden. Bei einer exakten Terminberechnung ergibt sich bei gegebenem Absatzprogramm für die erforderlichen Stückzahlen für jedes Teil eine Häufigkeitsverteilung über die Termine, z.B. folgender Form:



Figur 8

Für jeden Termin müßte man hierfür die Termine der Einsatzteile gemäß Gleichung (66) berechnen. Wenn man Klassen von Terminen bildet, d.h. wenn man bestimmte Terminfolgen (z.B. je 4 Tage) als einen Termin betrachtet, so muß man zwar die gesamte Produktion der Terminfolge auf den ersten

Termin der Klasse kumulieren, weil man nicht weiß, zu welchem genauen Termin die auf eine Klasse entfallende Produktion gehört. Der Rechenaufwand verringert sich dann aber beträchtlich, weil in der gesamten Terminrückrechnung nun die Zahl der Termine nicht fortlaufend anschwillt, sondern je nach Wahl der Klassenbreiten begrenzt bleibt. Wenn man z.B. für die Verteilung oben 4-Tages-Klassen bildet, wäre der Rechenaufwand für diese Stufe nur 1/4 so groß, denn man hätte nun die folgende Verteilung auf die Anfangstermine der Klassen:



Figur 9

Für die Produktionseingabe liefert diese Verteilung quantitativ die gleiche Information wie die exakte Verteilung. Denn entweder produziert man diskontinuierlich in Losen; diese lassen sich hier genau so bilden, und zwar wird man die Klassenbreite nach der Erfahrung schon von vornherein so festlegen können, daß die auf einen Termin durch die Klassenbildung kumulierte Produktion im Durchschnitt gerade eine günstige Losgröße (oder ein Vielfaches davon) ausmacht. Oder man will über den Bedarfszeitraum möglichst kontinuierlich fertigen; die Produktionsglättung ist von der detaillierten wie von der klassenweise kumulierten Verteilung aus möglich und liefert im Prinzip das gleiche Ergebnis.

Durch die Klassenbildung und die Kumulation auf die Klassenanfangstermine werden gewisse Zwischenlager zugelassen.

Soweit man diskontinuierlich in Losen produziert, dürften diese Lager im wesentlichen mit den dann sowieso vorhandenen "Losgrößenlagern"[83] identisch sein; hier würden also durch die nur näherungsweise aufgestellte Terminplanung keine zusätzlichen Lager erzeugt werden. Anders bei kontinuierlicher Produktion: Durch die Kumulierung auf die Klassen-Anfangstermine kann bei der Produktionsglättung eine für die Glättung erforderliche vorzeitige Produktion weiter vorverschoben werden, als es nach den tatsächlichen Terminen nötig wäre. Die für die Produktionsglättung erforderlichen Zwischenlager erweitern sich dann um eine gewisse Größe nur wegen des Näherungsverfahrens für die Terminplanung; und die Produktionsdauer insgesamt verlängert sich, weil für die auf diese Weise "zu früh" zu fertigenden Teile die Einsatzteile auch wiederum "zu früh" terminisiert werden. Aber diese zusätzlichen Zwischenlager und diese Ausweitung der Produktionsdauer dürften in gar keinem Verhältnis zu den Lagern und Vorverschiebungen stehen, die erforderlich werden, wenn man gemäß Vaszonyi die gesamte Produktion eines Teiles auf den ersten Termin des Verbrauches, also auf den ersten Anfangstermin kumuliert und auf eine Terminplanung im engeren Sinne verzichtet.

2.24 Zusammenfassung

Die rechnerische Teile-Einsatz-Planung ist prinzipiell möglich. Aus den Produktions- und Konstruktionsgegebenheiten ergibt sich der direkte Teile-Einsatz, also die Matrix A mit den Elementen a_{ij} (vgl. Abschnitt 2.22). Die Teile lassen sich dabei gruppieren in solche Teile, die nur Einsatzgut sind, solche, zu deren Herstellung es Teile der ersten und zweiten Gruppe

---

83) s. S. 102 ff.

bedarf u.s.f., am Ende stehen die Teile, die nur Endprodukt sind.

Verzichtet man auf die Terminplanung im engeren Sinne, so errechnen sich die Elemente b_{ij} der Gesamtteilebedarfsmatrix $\mathfrak{b}$ nach den Gleichungen

$$(51) \qquad b_{ij} = \sum_{k=1}^{m} a_{ik}\, b_{kj} \qquad \begin{matrix} i = 1...m \\ j = 1...m \end{matrix} \quad i \neq j$$

$$(52) \qquad b_{ii} = 1 \qquad i = 1...m \quad i = j$$

Als Produktionstermin für die einzelnen Teile insgesamt ist dann der Termin vorzusehen, der für den ersten Einsatz eines einzelnen Teiles erforderlich ist; er ergibt sich aus der Rückrechnung der bekannten Produktionszeiten für die Teile von den End-Teilen zu den Nur-Einsatzteilen hin. Diese Zeiten lassen sich zusammenfassen zu einer Termin-Matrix, deren Elemente analog zur Matrix $\mathfrak{b}$ angeben, um wieviel früher alle Einsatzteile i für das Produkt j gefertigt werden müssen.

Will man eine Terminplanung im engeren Sinne durchführen, d.h. will man die zeitliche Verteilung des Gesamtbedarfs an jedem Einsatzteil berücksichtigen und somit die bei der einfachen Terminplanung oben zwangsläufig entstehenden Zwischenlager beseitigen (oder zumindest stark reduzieren), so stößt eine exakte Rechnung wegen der großen Zahlenmengen auf Schwierigkeiten. Als hinreichendes Näherungsverfahren bietet es sich an, für die Teile Terminklassen zu bilden und fortlaufend von den End-Teilen zu den Nur-Einsatzteilen hin für jede Terminklasse eines Teils den Termin für die Einsatzteile zu berechnen nach der Gleichung (66)

$$(66) \qquad v_K\, T_j(Z) = \sum_{i=1}^{m} a_{ij}\, v_K\, T_i(Z - t_j) \qquad \begin{matrix} j = 1...m \\ K = k...m \end{matrix}$$

wobei v_K $T_j(Z)$ zu erzeugendes Teil j in der Menge v_K zum Termin Z, a_{ij} der direkte Teileeinsatz von Teilen i in das Teil j und t_j die Produktionszeit eines Teiles j aus den direkten Einsatzteilen T_i sind.

Ob eine derartige Teile-Einsatzplanung für den speziellen Einzelfall sinnvoll und günstig ist, ist natürlich eine Tatfrage. Sie wird es zweifellos sein, wenn die Verflechtungen groß und die Teile relativ wertvoll sind, so daß auch geringfügige Einsparungen in den Zwischenlagern von Bedeutung sind, und wenn ein Elektronenrechner sowieso zur Verfügung steht. Ebenso wird sie in Betracht zu ziehen sein, wenn der Betrieb in seiner Kapazität voll ausgelastet ist und wenn daher ein großes Interesse daran besteht, die Fertigung ungestört und möglichst schnell ablaufen zu lassen und keine Kraft darauf zu verwenden, kurzfristig unnütz auf Lager zu produzieren. Die Teile-Einsatzplanung kann sich in der obigen Form erübrigen, wenn die Zusammensetzung des Absatzplanes nur wenig schwankt, so daß der Teile-Bedarf und die Termine auch durch Schätzungen aufgrund der bisherigen Erfahrung gut bestimmt werden können. Ebenso kann eine genaue Teile-Einsatzplanung sekundär sein, wenn stets eine durchschnittliche Menge der Teile in Auftrag gegeben wird, um die Beschäftigung auch in den einzelnen Fertigungsabteilungen auf einem gleichmäßigen Niveau zu halten. Hierdurch können einerseits unverhältnismäßig hohe Zwischenlagerbestände, andererseits Mangel an einzelnen Teilen und damit Stillstandzeiten der schon fertigen, weiter zu verarbeitenden Teile und so eine Ausdehnung der Produktionsdauer verursacht werden.

2.3 Ablaufplanung

Die Erörterungen zum Problem der Teile-Einsatzplanung haben gezeigt, daß die Regelung des Fertigungsablaufs, also die Planung der Reihenfolge der Maschinenbelegung und damit der Termine, Zwischenlager und Produktionsdauer, für den Mehrprodukten-Mehrstufenbetrieb von wesentlicher Bedeutung sein kann. Diese Fertigungssteuerung ist zwar im einzelnen sehr stark abhängig von den Gegebenheiten der Produktion und des Absatzes im speziellen Betrieb, trotzdem müssen sich auch für sie einige generelle Regeln und Zusammenhänge feststellen lassen. Ihren theoretischen Hintergrund können diese allerdings weniger in den Erkenntnissen der allgemeinen Wirtschafts- und Produktionstheorie finden; denn diese abstrahiert von den Einzelheiten der Mehrstufenfertigung und betrachtet nur Produkte, nicht aber ihre innerbetriebliche Aufteilung und Entstehung in der Reihenfolge Rohstoff - Halbfabrikat verschiedenen Bearbeitungsgrades - Endprodukt. Diese Fertigungsprobleme sind einzelbetrieblich-technischer Natur; ihre Lösung wird in Form der Input-Koeffizienten in den produktionstheoretischen Betrachtungen vorausgesetzt. Die Analyse des Betriebsprozesses muß aber auch eine nähere Betrachtung der Inputkoeffizienten einschließen; denn diese sind - gerade im Hinblick auf die Ablaufplanung - nicht immer nur technischer Natur und mithin einfach gegeben, sondern oft ökonomisch, d.h. ohne besonderen technischen Mitteleinsatz und nur durch bestimmte Anordnung und entsprechenden zeitlichen und mengenmäßigen Einsatz der Produktionsfaktoren, beeinflußbar.

Grundlage und Datum für die Ablaufplanung sind die zeitliche Dauer der Fertigung und die Bestimmungsgründe naturgesetzlicher Art dafür. Der Einfluß der Produktionsdauer auf die Produktionsfunktion der Betriebe allgemein und damit der Gesamt-

wirtschaft war zu Zeiten ein Streitpunkt unter den Theoretikern[84]; er interessiert uns hier nicht. Ebenso ist es für uns hier nicht wesentlich, die natürlichen und technischen Ablaufgesetze und ihre grundsätzliche Beeinflußbarkeit durch technische oder organisationstechnische Maßnahmen zu analysieren[85]. Es geht in diesem Abschnitt vielmehr darum, bloße ökonomische Reihenfolgeprinzipien und entsprechende Verfahren anzugeben, die den innerbetrieblichen Ablauf der Mehrstufenfertigung unter Wahrung der produktionstechnischen Erfordernisse und technischen Gegebenheiten so regeln, daß das einzelwirtschaftliche Ziel der Minimierung der Durchlaufzeit und der Zwischenlager und der mit diesen verbundenen Kosten für mehrere Güter insgesamt erreicht werden kann.

Das Problem der Ablaufplanung ist an sich so alt, wie der Mehrstufenbetrieb überhaupt; man löst es im allgemeinen durch Schätzverfahren wie willkürlich festgesetzte Maschinenbelegungspläne, Durchflußdiagramme, Terminzwang ohne Rücksicht auf dadurch erforderliche Überstunden u.ä. Für die Mehrproduktenfertigung wird nun, wenn nicht gerade eine reine Fließfertigung vorliegt, bei der für jedes Gut eine gesonderte Folge von Arbeitsvorrichtungen vorhanden (und ausgenutzt) ist, das Durchflußproblem leicht sehr unübersichtlich, so daß der Fertigungsablauf nur in groben Zügen geplant wird und die tatsächlichen Arbeitsfolgen den Meistern in gewissen großen Grenzen

---

84) Vgl. die Theorie der "Produktionsumwege" (und damit der Produktionsdauer) von Böhm-Bawerk (Kapital und Kapitalzins, 4. Aufl. Jena 1921, 2. Abt. 1. Bd. Positive Theorie des Kapitales, S. 318 ff.) und die nachfolgende Diskussion, besonders E. Schneider: "Das Zeitmoment in der Theorie der Produktion", Jahrbücher für Nationalökonomie und Statistik, Bd. 142 (1935), S. 271 ff. und Bd. 144 (1936), S.129 ff.

85) Hierzu vgl. die diesen Gesichtspunkt hervorhebende Darstellung von Th. Ellinger: Ablaufplanung, Stuttgart 1959

überlassen werden. Diese entscheiden sich dann für den in ihrer Abteilung günstigen Ablauf, ohne dabei zu berücksichtigen, daß hierdurch der Ablauf in den nachfolgenden Stufen vielleicht nur noch ungünstig geregelt werden kann. Fertigungsmäßig schwierigere und langwierigere Teile können so stets möglichst verschoben werden, so daß sie eine besonders lange Durchlaufzeit bekommen. Diesem grundlegenden Mangel, bei dem der Blick für das Gesamtinteresse verloren gegangen ist, kann nur dadurch begegnet werden, daß eng begrenzte Terminschranken vorgeschrieben werden und die Einhaltung der Termine streng (durch "Terminjäger", wie es unter den Arbeitern und Meistern genannt wird) überwacht wird. Damit werden in aller Regel zugleich Reibungsflächen und Unzuträglichkeiten und Ärger geschaffen, unter denen das Betriebsklima leidet und die durch Meisterbesprechungen u.ä. nur unzureichend wieder ausgeglichen werden können. Schon allein aus diesem Grunde und nicht nur wegen der möglichen Kostensenkungen durch Verminderung der Durchlaufzeiten und Zwischenlager ist eine geregelte Ablaufplanung, die durchaus den Meistern eine gewisse Dispositionsfreiheit lassen kann, im Mehrstufen-Mehrproduktenbetrieb unbedingt anzustreben.

2.31 Losgröße, Durchlaufzeit und Zwischenlager

2.311 Problemstellung

Die nach dem Absatzplan zu fertigenden Mengen werden im Regelfall zu Losen bestimmter Größe zusammengefaßt und als solche geschlossen in die Fertigung gegeben. Dem Ziel nach wird die Losgröße dabei so festgelegt, daß die Kosten je Los (Einrichte- und Prüfkosten) und die Kosten für die Lagerung zu früh fertiger Teile abgewogen und insgesamt minimiert werden. Die Länge der Durchlaufzeit der Produkte durch die Fertigungsstufen und -stationen und damit die Höhe der Zwischenlager wird nun in erster Linie bestimmt durch die Größe der in die Fertigung gegebenen Lose; denn entweder werden ganze Lose oder es werden Losabschnitte von Station zu Station weitergegeben, in jedem Falle bleibt jedes Teil für die Zeit der Bearbeitung der übrigen zugehörigen Teile-Menge in der Bearbeitungsstation liegen, und es entstehen Wartezeiten und Lager.

Wie groß sind diese Wartezeiten? Wenn man wie Gutenberg[86] und darauf aufbauend Ellinger[87] einfach unterstellt, daß die Lose geschlossen für die Zeit der Bearbeitung des gesamten Loses in einer Station liegen bleiben, so muß jedes Teil des Loses eine Zeit von

$$(67) \qquad w_s = (L - 1) \cdot b_s$$

warten, wobei w_s die Wartezeit für ein Stück in der Station s, L die Losgröße in Stück und b_s die Bearbeitungszeit je Stück in der Station s sind. Die Summe der Wartezeiten aller Teile des Loses L ist dann folgender Betrag:

$$(68) \qquad \sum_{j=1}^{L} w_{sj} = L \cdot (L - 1) \cdot b_s = L^2 b_s - L\, b_s$$

---

86) E. Gutenberg: Grundlagen ..., a.a.O., Bd. 1, 8/9. Aufl. 1963, S. 165

Gutenberg und Ellinger kommen also unter ihren Voraussetzungen zu dem Ergebnis, daß gemäß (68) die gesamte Wartezeit quadratisch von der Losgröße abhängt, aber nur linear und proportional von der Bearbeitungszeit. Es lohnt sich daher, wenn man die gesamte Bearbeitungsdauer und die Zwischenlager reduzieren will, viel mehr, die (in weiten Grenzen ökonomisch frei bestimmbare) Losgröße zu verändern, als durch meist technisch aufwendige Maßnahmen die reine Bearbeitungszeit der Werkstücke zu vermindern.

Ellinger entwickelt daraus eine Beziehung der "optimalen Werkstattlosgröße"[88] und berücksichtigt damit unseres Wissens zum ersten Mal den Einfluß der Produktionsdauer (t) und der Zwischenlagerkosten (p) auf die optimale Losgröße. Die vorangegangenen Überlegungen von Andler[89], G. Meyer[90] und Schlüter[91] fingieren dem Prinzip nach eine zeitlose Produktion einer Stufe und setzen nur ein Fertiglager voraus. Dieses wird gebildet, weil die Fertigung durch die Zusammenfassung in Lose nicht parallel zum Absatz erfolgt. Solche Fertiglager sind aber anderer Natur als die Zwischenlager, die aufgrund der Losgrößen zwangsläufig

---

87) Th. Ellinger: Ablaufplanung, Stuttgart 1959, S. 90/91

88) ebenda, Seite 91/92: $x = \sqrt{\frac{A}{t\, f_{kA}\, S\, \frac{p}{100}}}$

wobei

- x = gesuchte Größe des Einzelloses (Stück)
- A = fixe Auflagekosten je Einzellos (DM)
- t = Bearbeitungszeit für ein Stück (Zeiteinheit je Stück)
- f_{kA} = Korrekturfaktor zur Kennzeichnung des Grades der Ausnützung der Kalenderzeit. Er berücksichtigt, daß die Bearbeitungszeit nur dann allein maßgebend ist für die Höhe der Zinskosten, wenn sie sich mit der Kalenderzeit deckt, also bei einer ununterbrochenen Bearbeitung (dimensionslos)
- S = Herstellkosten je Stück (DM je Stück)
- p = Zinssatz je Zeiteinheit (1/Zeiteinheit)

Vgl. dazu auch S. 116 ff. hier

89) K. Andler: Rationalisierung der Fabrikation und optimale Losgröße, Dissertation, Stuttgart 1929

entstehen und zunächst unabhängig von den Gegebenheiten des Absatzes sind. Da nun die Zwischenlager in den Mehrprodukten-Mehrstufenbetrieben eine außerordentlich große Rolle spielen (sie machen oft ein Vielfaches der Fertigwarenbestände aus), sind die Erörterungen von Gutenberg und Ellinger zweifellos die realistischeren und dem Problem der industriellen Mehrstufenfertigung angemesseneren.

Beide betrachten aber die Fertigung in Losen nicht konsequent im Ablauf durch mehrere Stationen; denn sie gehen in ihrer Deduktion von einer Voraussetzung aus, die nicht, wie es scheint, selbstverständlich ist, sondern nur mit Transportkostenerwägungen begründet werden kann: Die Fertigung in Losen setzt nicht notwendigerweise voraus, daß die ersten Werkstücke eines Loses solange in der Bearbeitungsstation liegen, bis auch die letzten fertig sind. Die Wartezeiten, die zwangsweise durch die Fertigung in Losen entstehen, hängen vielmehr theoretisch nur von dem Verhältnis der Bearbeitungsgeschwindigkeiten in den aufeinanderfolgenden Stationen ab. Haben beispielsweise die aufeinanderfolgenden Stationen die gleichen Takte, d.h. Bearbeitungsgeschwindigkeiten (Ausstoß in Stück je Zeit), so ist, wenn zunächst von Transportzeiten abgesehen wird, theoretisch überhaupt kein Zwischenlager erforderlich; denn sobald ein Werkstück die eine Station verläßt, kann es auf der nächsten bearbeitet werden, ohne daß das Los zerreißt oder sich kumuliert. Eine solche Fertigung, bei der die aufeinanderfolgenden Stationen die gleichen Takte haben, ist eine Fließfertigung. Sie ist aber zugleich eine Fertigung in Losen; denn diese werden gebildet, um auf einer Maschine in jeder Station zusammenhängend mög-

90) G. Meyer: Die Auftragsgröße in Produktions- und Absatzwirtschaft, Leipzig 1941

91) H. Schlüter: "Zum Problem der optimalen Losgröße", Zeitschrift f. handelswiss. Forschung, Neue Folge 6. Jg. (1954), S. 188-203

lichst viele gleiche Werkstücke zu bearbeiten, weil dadurch der Losgrößeneffekt (mit steigender Losgröße zunächst stark sinkender Anteil der Rüstkosten für jedes Stück bei zun ächst schwach steigenden Kosten für die Lagerung zu früh fertiger Teile) erreicht wird. Dieser Losgrößeneffekt entsteht also auch, wenn die Fertigung rein betriebstechnisch in einer Fließfertigung und ohne Zwischenlager vor sich geht, bei der nacheinander verschiedene Lose verschiedener Art durchgeschleust werden, zwischen denen jeweils Umstellungen und Neueinrichtungen der Maschinen erforderlich sind.

Haben die Maschinen der aufeinanderfolgenden Stationen unterschiedliche Takte, so müssen, wenn die Lose geschlossen über je eine Maschine laufen sollen, Zwischenlager gebildet werden. Und zwar muß, wenn eine langsamere Station auf eine schnellere zuarbeitet, ein "Zerreißlager" vor der schnelleren Station aufgebaut werden, damit in dieser ohne Unterbrechung gefertigt werden kann; dagegen entsteht ein "Kumulationslager", wenn eine schnellere Station auf eine langsamere zuarbeitet. Wie groß sind diese Zwischenlager, die nur wegen der Fertigung in Losen gebildet und die auch bei einer Abschätzung der optimalen Losgröße berücksichtigt werden müssen?

2.312 Theoretisch erforderliche Zwischenlager[92)]

Es seien zunächst zwei aufeinanderfolgende Stationen S_1 und S_2 mit den Maschinentakten T_1 und T_2 (Stück je Zeit) betrachtet.

Fall 1: Zerreißlager

Wenn die zweite Station schneller als die erste (d.h. $T_1 < T_2$) ist, so muß vor S_2 ein Zerreißlager gebildet werden. Die

92) Hierzu vgl. U. Pfaffenberger: "Produktionsplanung bei losreihenfolgeabhängigen Maschinenumstellkosten", Unternehmensforschung, Bd. 4 (1960), Abschnitt 1, S. 31/32

Station S_1 beginne zu einem bestimmten Zeitpunkt t_1 ein Los der Losgröße L zu produzieren. Wie lange (w?) müssen die ersten Stücke des Loses vor S_2 liegen, ehe sie dort in Arbeit genommen werden können?

Es gilt:

$$t_1 + \frac{L}{T_1} = t_1 + w + \frac{L}{T_2} \tag{69}$$

d.h. wenn beide Maschinen vom gleichen Zeitpunkt t_1 aus betrachtet werden, dann muß die Wartezeit w so groß sein, daß die Bearbeitungszeit auf der zweiten Maschine $\frac{L}{T_2}$ erst beendet ist, wenn Maschine 1 mit der Geschwindigkeit $\frac{L}{T_1}$ bereits mit dem ganzen Los fertig ist. Die Bearbeitungszeit des letzten Stückes in der zweiten Station sei vernachlässigt. Nach (69) wird die erforderliche Wartezeit also bestimmt aus:

$$w = L\left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right) = \frac{L}{T_1}\left(\frac{T_2 - T_1}{T_2}\right) \tag{70}$$

Anders ausgedrückt: Während bei Gutenberg/Ellinger alle Teile eines Loses eine Wartezeit in der Länge der gesamten Bearbeitungszeit $\frac{L}{T_1}$ durchmachen müssen, ist theoretisch unter der Voraussetzung der jeweils geschlossenen Bearbeitung eines Loses nur für einen Prozentsatz seiner Teile ein Warten zwingend, nämlich für

$$X = \left(\frac{T_2 - T_1}{T_2}\right) \cdot 100\ \% \tag{71}$$

des Loses.

Die maximale Größe des Zerreißlagers R_{max} beträgt also für den Durchfluß eines Loses

$$R_{max} = L\left(\frac{T_2 - T_1}{T_2}\right) \text{ Stück} \tag{72}$$

die durchschnittliche Größe des Zerreißlagers R ist dann:

$$(73) \qquad R = \frac{L}{2} \left(\frac{T_2 - T_1}{T_2}\right) \text{ Stück} .$$

Fall 2: Kumulationslager

Arbeitet Station S_2 langsamer als S_1 ($T_1 > T_2$), so ist vor S_2 keine Wartezeit erforderlich, beide Stationen können zum gleichen Zeitpunkt beginnen, wenn von Transport- und Sicherheitszeiten wieder zunächst abgesehen und die Fertigungszeit des ersten Stückes in der ersten Station vernachlässigt wird. Es entsteht aber jetzt eine Verzögerungszeit v, um die S_2 länger an dem Los arbeitet als S_1 und in der sich vor S_2 ein Lager K ansammelt. Diese Verzögerungszeit v und dieses Kumulationslager K gehorchen denselben Gesetzen wie die Wartezeit w und das Zerreißlager R, nur ändern sich die Vorzeichen; es gilt also analog zu (69) bis (71)

$$(74) \qquad v = L \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}\right)$$

und analog zu (71) bis (73)

$$(75) \qquad K_{max} = L \left(\frac{T_1 - T_2}{T_1}\right)$$

$$(76) \qquad K = \frac{L}{2} \left(\frac{T_1 - T_2}{T_1}\right) .$$

Ihrer Größe nach sind v und w und ebenso K und R gleich. Man kann daher, wenn man mit Absolutbeträgen rechnet, zusammenfassen:

1. Erforderliche Lagerzeit vor der Station S ($S \neq 1$):

$$(77) \qquad l_s = L \left| \frac{1}{T_s} - \frac{1}{T_{s-1}} \right| \quad \text{(Zeit)}$$

2. Erforderliche durchschnittliche Zwischenlagermenge vor der Station S (S ≠ 1):

$$(78) \qquad Z_s = \frac{L}{2} \left| \frac{T_s - T_{s-1}}{T_{max}} \right| \text{ (Stück)}$$

Hierbei ist T_{max} der größere der beiden Takte T_s und T_{s-1}.

Diese Beziehungen gelten für den Durchlauf eines Loses durch zwei Stationen. Welche Lagermengen ergeben sich nun für den gleichzeitigen Durchlauf mehrerer Lose durch mehrere Stationen? Theoretisch wird das durchschnittliche Zwischenlager vor einer Station S, wenn alle Maschinen der Station in der Anzahl m_s beschäftigt und überzählige Lose nicht vorhanden sind:

$$(79) \qquad Z_s = m_s \frac{\bar{L}}{2} \left| \frac{T_s - T_{s-1}}{T_{max}} \right| \text{ (Stück)}$$

wobei $\bar{L}$ die durchschnittliche Losgröße (Zahl aller zu produzierenden Teile dividiert durch die Anzahl der Lose) ist. Die gesamte nicht zu vermeidende, durchschnittliche minimale Zwischenlagerung bei Mehrstufenproduktion in Losen wird, wenn man, um die aufeinanderfolgenden Zwischenlager vergleichen und addieren zu können, die Lagerwerte verwendet:

$$(80) \qquad GZ^+ = \sum_{s=1}^{n} g_{s-1} m_s \frac{\bar{L}}{2} \left| \frac{T_s - T_{s-1}}{T_{max}} \right| \text{ (DM)}$$

wobei n die Zahl der Stationen und g_s der Wert je Stück nach der Fertigung in der Station s ist; für s=1 sei $g_{s-1} = 0$, d.h. die Material-Vorlager bleiben hier außer Betracht.

Geht man dagegen wie Gutenberg und Ellinger davon aus, daß die Lose solange bei jeder Maschine liegen, bis auch das letzte Teil gefertigt ist, so wird die durchschnittliche Mindest-Zwischenlagerung:

$$(81) \qquad GZ = \sum_{s=1}^{n} g_{s-1} m_s \frac{\bar{L}}{2} \text{ (DM)}$$

sie wird also in jedem Falle größer als oben, wo die Lose auch geschlossen auf einer Maschine bearbeitet, aber eher, entsprechend den Taktrelationen, weitergegeben werden. Das theoretisch erforderliche Zwischenlager ist also um die Taktverhältnisse kleiner, als das nach (81). Verhalten sich die Takte im Durchschnitt z.B. wie 1:2 (eine durchaus realistische Unterstellung), so ist das Lager nach (81) doppelt so groß wie das theoretisch erforderliche Lager nach (80).

Die gesamte minimale Durchlaufzeit kann aus den oben benutzten bzw. errechneten Werten ermittelt werden. Folgt eine langsame Station auf eine schnelle, so ergibt sich, wenn von Transportzeiten und Umstellungszeiten und von der Fertigungszeit des ersten Stücks in der schnelleren Ausgangsstation zunächst wieder abgesehen wird, eine Verzögerung um v (vgl. 74), folgt eine schnelle Station auf eine langsame, so entsteht in der Gesamtdurchlaufzeit keine Verzögerung, eine Zeitverschiebung w (vgl. 70) ergibt sich lediglich bei den Produktionsanfängen. Betrachtet man das folgende Beispiel in Figur 10, so wird ohne weiteres klar, daß beim Durchlauf eines Loses durch mehrere Stationen mit unterschiedlichen Takten die Summe aller Verzögerungszeiten v + der Bearbeitungszeit in der letzten Station gleich Summe aller Wartezeiten w + der Bearbeitungszeit in der ersten Station und dieses gleich der minimalen Durchlaufzeit ist, also:

$$(82) \qquad \sum_{s=1}^{n} v_s + T_n^{\frac{L}{}} = \sum_{s=1}^{n} w_s + T_1^{\frac{L}{}} = d_{min}$$

v_s = Verzögerungszeit in allen gegenüber der Folgestation langs. Stationen[93)]

w_s = Wartezeit in allen gegenüber der Folgestation schnelleren Stationen[93)]

d_{min} minimale Durchlaufzeit

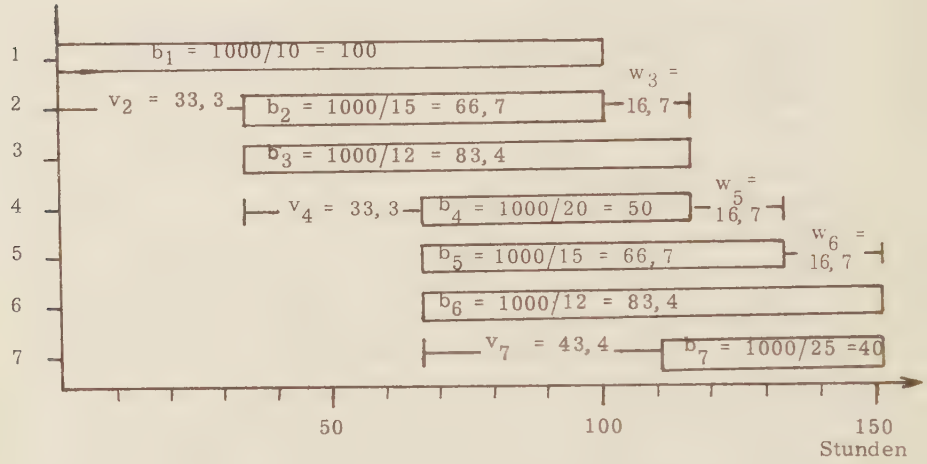
93) Bezieht man die Indizierung der Verzögerungs- und Wartezeiten auf die zweite der betrachteten Stationen, so muß für $s = 1$ $v_s = 0$ bzw. $w_s = 0$ gelten.

Als willkürliches Beispiel diene die Fertigung eines Loses von 1000 Stück durch 7 Stationen mit folgenden Takten:

T_1 = 10 Stück/Stunde T_2 = 15 Stück/Stunde T_3 = 12 Stück/Stunde
T_4 = 20 Stück/Stunde T_5 = 15 Stück/Stunde T_6 = 12 Stück/Stunde
T_7 = 25 Stück/Stunde

Das Durchlaufdiagramm ist dann:

Figur 10



Σ v + b_7 = 33, 3 + 33, 4 + 43, 4 + 40, 0 = 150, 1 Stunden

= Σ w + b_1 = 16, 7 + 16, 7 + 16, 7 +100, 0 = 150, 1 Stunden

= d_{min} = minimale Durchlaufzeit

Gibt man dagegen die Lose nur geschlossen weiter, so ist die gesamte Durchlaufzeit gleich der Summe der Bearbeitungszeiten:

(83) $$d = \sum_{s=1}^{n} \frac{L}{T_s}$$

Die Lagerkosten insgesamt setzen sich zusammen aus der Lagerzeit und den Lagerkosten je Zeiteinheit.

Für die minimale Zwischenlagerhaltung sind daher (gemäß 80 und 82), wenn h der Zinssatz (Dimension: 1/Zeiteinheit) ist, die Lagerkosten:

$$(84)\quad LK^{+} = \left(\sum_{s=1}^{n} g_{s-1} m_s \frac{\bar{L}}{2} \left| \frac{T_s - T_{s-1}}{T_{max}} \right|\right) \cdot h \cdot \left(\sum_{s=1}^{n} v_s + \frac{\bar{L}}{T_n}\right)$$

Dagegen gilt für die Lagerkosten bei geschlossener Losweitergabe (vgl. 81 und 83)

$$(85)\quad LK = \left(\sum_{s=1}^{n} g_{s-1} m_s \frac{\bar{L}}{2}\right) \cdot h \cdot \left(\sum_{s=1}^{n} \frac{\bar{L}}{T_s}\right) \text{ (DM)}$$

Die Losteilung kann also einen wesentlichen Einfluß auf die Zwischenlager haben; denn der Taktdifferenzfaktor mindert in (84) im Gegensatz zu (85) sowohl in der ersten Summe als auch durch die gegenüber der Summe aller Bearbeitungszeiten sehr viel kleinere Zeit v_s (vgl. 74) in der zweiten Summe die Lagerkosten. Je kleiner die Taktdifferenzen sind, umso größer ist die Lagereinsparung. Diese Beziehungen sind aber zunächst nur ein Teilergebnis; denn es wurden bisher lediglich die logische Möglichkeit der Losteilung und die daraus resultierenden Zwischenlagerverminderungen betrachtet.

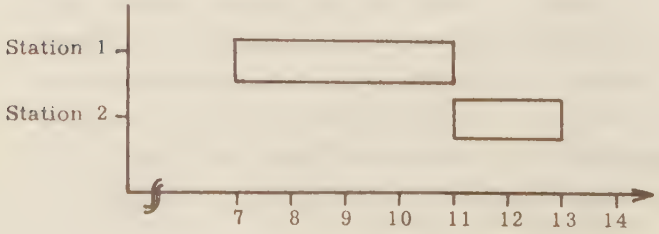
In der Realität werden die Mengen nach (80) und (81) und die Zeiten nach (82) und (83) größer sein. Beide Beziehungen für die minimale Zwischenlagermenge und beide für die Durchlaufzeiten berücksichtigen nicht, daß es wegen der unterschiedlichen Bearbeitungsgeschwindigkeiten und der daher für den Ausgleich der Kapazität notwendig unterschiedlichen Maschinenbestände nicht immer möglich sein wird, den Fertigungsablauf so festzulegen, daß die aufeinanderfolgenden Maschinen gerade frei sind, wenn ein Los in der Vorstation soweit bearbeitet (bzw. beendet) ist, daß es in der nächsten Station begonnen werden könnte. Auf diese Art von zusätzlichen Wartezeiten und Lagern, die u.U. ein beträchtliches Ausmaß annehmen können und das Kernproblem der Ablaufplanung bei Mehrprodukten-Mehrstufenfertigung darstellen, soll im folgenden (S. 130 ff.) noch näher eingegangen werden. Die Beziehungen berücksichtigen ferner weder Lade- und Transport-

zeiten, die je nach Art und Menge der Güter nicht unwesentlich sein können, noch gewisse Sicherheitszeiten, die immer eingerechnet werden müssen, weil die verwendeten Zahlen für die Bearbeitungsgeschwindigkeiten nur Mittelwerte sind und um diesen Wert streuen, verursacht z.B. durch Werkzeugbruch, Maschinendefekt, Stromausfall, unterschiedliche Fertigkeit der Arbeitskräfte u.ä. Diese Verzögerungszeiten und Lager werden sich aber für den speziellen Fall abschätzen lassen und können als Konstante zu (80) bzw. (81) und (82) bzw. (83) hinzugerechnet werden. Der Vergleich von geschlossener Losweitergabe und Losteilung wird allerdings problematisch, wenn für die beiden Fälle unterschiedliche Konstanten als Sicherheitszeiten anzusetzen und diese Zeiten im Verhältnis zu den Bearbeitungszeiten groß sind.

2.313 Berücksichtigung der Transportkosten

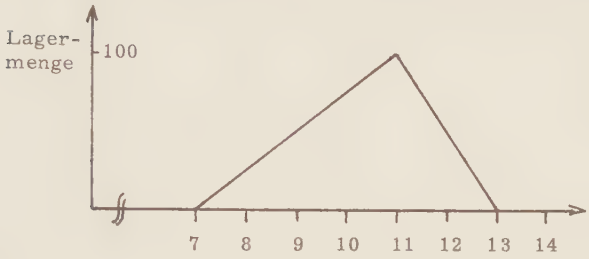
Die Frage ist nun, mit welchen zusätzlichen Kosten sich die Voraussetzung für Gleichung (80), Weitergabe von Losteilen, verwirklichen läßt. Was erfordert die Teilung der Lose für den Zweck der schnelleren Weiterleitung? Graphisch zeigt sich das Problem folgendermaßen:

Wird ein Los von der Größe 100 erst nach seiner vollständigen Fertigstellung weitergeleitet, so ergibt sich, wenn Station 1 25 Stück je Tag und Station 2 50 Stück je Tag herstellen können, die Takte sich also wie 1:2 verhalten, der in Figur 11 dargestellte Zeitablauf:



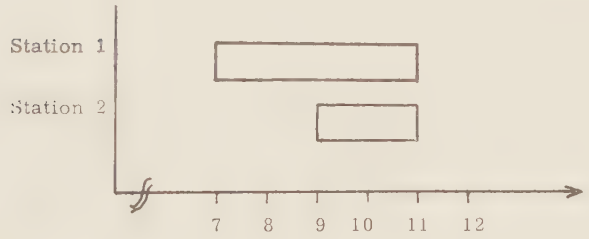
Figur 11

Transportiert wird nur zum Zeitpunkt 11. Der Lager-Auf- und Abbau für dieses Los ist aus Figur 12 ersichtlich:

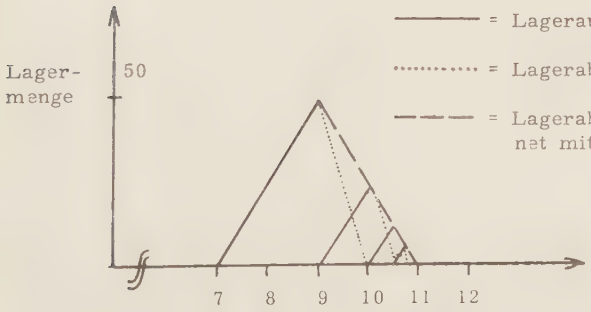


Figur 12

Werden dagegen Teile des Loses eher weitergeleitet, so daß beide Stationen zum gleichen Zeitpunkt (genau genommen um die Fertigungszeit des letzten Stückes in der zweiten Station verschoben) aufhören (vgl. Figur 13), so wird der Lager-Auf- und Abbau komplizierter (vgl. Figur 14):



Figur 13



Figur 14

Zwar erreicht man gemäß Gleichung (72) und (73) ein halb so großes maximales Lager und ein halb so großes durchschnittliches Lager und das für eine kürzere Zeit, aber es muß mehrmals transportiert werden; nämlich im Beispiel

wenn		50	Teile	in	Station	1	gefertigt	sind,
"	weitere	25	"	"	"	"	"	"
"	"	12	"	"	"	"	"	"
"	"	6	"	"	"	"	"	"
"	"	3	"	"	"	"	"	"
"	"	2	"	"	"	"	"	"
"	"	2	"	"	"	"	"	"

also 7 mal. Allgemein sind, da das Los fortlaufend durch das Taktverhältnis geteilt werden muß, um den Anschluß zu sichern,

(86)
$$n = \frac{\log \frac{L}{T_{max}}}{\log \frac{T_{max}}{T_{min}}}$$

Transporte erforderlich, wobei T_{max} der größere und T_{min} der kleinere der beiden Takte T_s und T_{s-1} ist. Denn im Prinzip (wegen der erforderlichen Ganzzahligkeit sind Abrundungen unumgänglich, vgl. das Zahlenbeispiel) muß so oft geteilt werden, bis zum Schluß nur noch ein Teil zu transportieren ist, also

(87)
$$\frac{L}{\left(\frac{T_{max}}{T_{min}}\right)^n} = 1$$

(88)
$$\log L = n \log \frac{T_{max}}{T_{min}}, \text{ daraus folgt (86)}$$

Für den umgekehrten Fall, bei dem die zweite Station gegenüber der ersten den langsameren Takt hat, gilt das entsprechende; nur müssen hier die kleinen Transporte zum Anfang gemacht werden.

Die Gleichungen (84), Lagerkosten bei minimaler Zwischenlagerhaltung, und (85), Lagerkosten bei geschlossener Losweitergabe, müssen, wenn sie das Problem vollständig beschreiben

sollen, entsprechend erweitert werden. Zwar vermindern sich bei Losteilung die Lagerkosten gegenüber der geschlossenen Losweitergabe, dafür entstehen aber durch die Transportteilung zusätzliche Transportkosten. Es sei unterstellt, daß unabhängig von der Transportmenge je Transport Kosten in Höhe von C_s auftreten. Bei geschlossener Losweitergabe vermehrt sich (85) um soviel Transporte, wie Stationen vorhanden sind, also werden die hier relevanten Kosten:

$$(89)\quad K = \left(\sum_{s=1}^{n} g_{s-1} m_s \frac{\bar{L}}{2}\right) \cdot h \cdot \left(\sum_{s=1}^{n} \frac{\bar{L}}{T_s}\right) + \sum_{s=1}^{n} C_s$$

Bei Losteilung entstehen in jeder Station die Transportkosten gemäß (86) mehrmals. Gleichung (84) erweitert sich also zu:

$$(90)\quad K^{+} = \left(\sum_{s=1}^{n} g_{s-1} m_s \frac{\bar{L}}{2} \left| \frac{T_s - T_{s-1}}{T_{max}} \right|\right) \cdot h \cdot \left(\sum_{s=1}^{n} v_s + \frac{\bar{L}}{T_n}\right) + \sum_{s=1}^{n} \frac{\log \frac{\bar{L}}{T_{max}}}{\log \frac{T_{max}}{T_{min}}} \cdot C_s$$

$$(s;s-1)$$

Hierbei sind:

g_s = Wert je Stück nach der Fertigung in der Station s (DM)

m_s = Anzahl der Maschinen in Station s (dimensionslos)

$\bar{L}$ = durchschnittliche Losgröße (Stück)

h = Lagerkostenzinssatz (1 / Zeiteinheit)

T_s = Takt der Maschinen in Station s (Stück / Zeit)

v_s = Verzögerungszeit des Fertigungsbeginnes zwischen Station s und s-1 (Zeit)

C_s = Transportkosten je Transport (DM)

Die Gleichungen (89) und (90) geben also erst eine vollständige Umschreibung unseres Problems wieder. Ob sich eine Lostei-

lung lohnt oder nicht lohnt, hängt von den Konstanten ab, insbesondere von den Taktdifferenzen, der Losgröße und der Höhe der Transportkosten im Verhältnis zu den Lagerkosten.

Selbstverständlich gibt es zwischen den beiden extremen Annahmen der größtmöglichen Losteilung und der geschlossenen Losweitergabe Zwischenformen. Man kann die Zahl der Transporte festlegen, im letzten Glied der Gleichung (90) den Faktor $\frac{\log \bar{L}}{\log \frac{T_{max}}{T_{min}}}$ also verkleinern, entsprechend müssen dafür die Lagerzeit und die Lagermenge im ersten Produkt von (90) vergrößert werden. Wie sich dieser Effekt auswirkt ist wiederum eine Tatfrage.

2.314 Theoretisch erforderliche Zwischenlager und optimale Losgröße

In unseren Erörterungen über das wegen der Aufteilung und Zusammenfassung der geplanten Fertigungsmengen in Lose zwangsläufig entstehende Zwischenlager sind wir von einer gegebenen Losgröße ausgegangen. Wie diese zustande kommt, wurde nur allgemein erwähnt. Offenbar sind aber die obigen Überlegungen nicht ohne Einfluß auf die Ermittlung einer optimalen Losgröße selbst; denn diese hängt zweifellos mit den Fertigungszeitspannen und den entsprechenden Zwischenlagern und Transporten unmittelbar zusammen.

2.3141 Bei geschlossener Losweitergabe

Für den Fall, den Ellinger[94] - auf Gutenberg aufbauend - im Auge hat, nämlich der nur geschlossenen Losweitergabe, ergibt

94) Th. Ellinger: Ablaufplanung, Stuttgart 1959, S. 89 ff.; vgl. auch hier S. 102 ff.

sich für eine Fertigungsstation die optimale Losgröße unter Berücksichtigung des sich während der Fertigungsdauer eines Loses kumulierenden Zwischenlagers folgendermaßen:

M sei die Gesamtmenge eines zu fertigenden Gutes, die in Lose der gesuchten Größe L aufgeteilt werden soll (Stück),

T_s sei der Arbeitstakt (Ausstoß in Stück je Zeiteinheit) in Station s,

$\frac{1}{T_s}$ ist dann die Bearbeitungszeit je Stück in Station s (Zeiteinheit je Stück),

S_s seien die variablen Herstellkosten je Stück in Station s (DM je Stück),

k_s seien die Lagerkosten je Stück und Zeiteinheit im Lager vor Station s; ebenso wie S. 108 sei die Material-Lagerung vor Station 1 unberücksichtigt, bei s=1 ist dann $k_s = 0$, (DM je Stück und Zeiteinheit),

A_s seien die (fixen) Einrichte- und Prüfkosten je Los in Station s (DM je Los),

C_s seien die Transportkosten je Transport (DM je Transport).

Die Gesamtkosten K_s für die Herstellung aller Teile M in der Station s setzen sich - soweit hier von Bedeutung - zusammen aus den (variablen) Produktionskosten, den Lagerkosten für die während der Fertigung eines Loses liegenden Teile, den (fixen) Einrichte- und Prüfkosten, die für jedes Los anfallen, und den Transportkosten. Aus einem noch deutlich werdenden Grunde seien die Transportkosten zunächst außer acht gelassen. Die variablen Produktionskosten sind die Fertigungskosten je Stück S_s vervielfacht um die insgesamt herzustellende Menge M; die Lagerkosten sind die durchschnittliche Lagermenge $\frac{L}{2}$ für die Lagerzeit $M\left(\frac{1}{T_s} + \frac{1}{T_{s-1}}\right)$ (das ist die insgesamt erforderliche Bearbeitungszeit, in welcher seit Beginn in der Vorstation s-1 bis zur Vollendung in der Station s die durchschnittliche Lagermenge bei gleichem Bearbeitungsstand gehalten werden muß; vgl. Figur 11 und 12) vervielfacht um die Lagerkosten je Stück

und Zeiteinheit k_s; die fixen Einrichtekosten A_s entstehen so oft, wie Lose gebildet sind $(\frac{M}{L})$. Also:

$$(92) \qquad K_s = MS_s + \frac{L}{2} \cdot k_s \cdot M\left(\frac{1}{T_s} + \frac{1}{T_{s-1}}\right) + \frac{M}{L} \cdot A_s$$

Sollen die Kosten K_s ein Minimum werden, so muß nach den Regeln der Differentialrechnung (92) nach L abgeleitet und gleich 0 gesetzt werden; ein Minimum ist dann erreicht, wenn die 2. Ableitung positiv wird.

$$(93) \qquad K'_s = \frac{M \cdot k_s}{2}\left(\frac{1}{T_s} + \frac{1}{T_{s-1}}\right) - \frac{M}{L^2} A_s = 0$$

d.h.

$$(94) \qquad L = \sqrt{\frac{2\,A_s}{k_s\left(\frac{1}{T_s} + \frac{1}{T_{s-1}}\right)}}$$

Gleichung (94) ist ein Minimum, da

$$(95) \qquad K''_s = + \frac{2 \cdot M \cdot A_s}{L^3} > 0$$

Gleichung (94) gibt also für die Station s die optimale Losgröße bei Nichtberücksichtigung der Transportkosten an. Es zeigt sich, daß diese unabhängig von der insgesamt zu fertigenden Stückzahl M ist und mit wachsenden Loskosten A_s steigt, dagegen mit wachsender Bearbeitungszeit je Stück $\frac{1}{T_s}$ und $\frac{1}{T_{s-1}}$ und wachsenden Lagerkosten je Stück und Zeit k_s fällt.

Von dem Ansatz Ellingers (vgl. S. 103 und Fußnote 88) unterscheidet sich diese Herleitung dadurch, daß wir das Lager nicht in einer Station, sondern zwischen zwei aufeinanderfolgenden Stationen sehen. Wir haben damit einmal nicht die Schwierigkeit, Werkstücke vor und nach der Bearbeitung in einer Station als einem Lager zugehörig anzusehen, und zum anderen werden auf

diese Weise die Weiterungen (Betrachtung mehrerer Stationen, Gegenüberstellung mit der optimalen Losgröße bei minimalem Zwischenlager) leichter darstellbar. Im Prinzip laufen beide Ansätze auf das gleiche Ergebnis hinaus.

Für die Mehrstufenfertigung kommt es nun nicht darauf an, für jede Station einzeln die optimale Losgröße zu ermitteln, vielmehr soll - im Interesse einer geordneten Ablaufplanung - für jede, insgesamt zu fertigende Gütermenge M für alle Stationen eine einheitliche Losgröße festgelegt werden. Die entsprechende Gesamtkostengleichung lautet, wenn man n Stationen hat, analog zu (92):

$$(96)\quad \sum_{s=1}^{n} K_s = \sum_{s=1}^{n} MS_s + \sum_{s=1}^{n} \frac{L}{2}\, k_s \cdot M\left(\frac{1}{T_s} + \frac{1}{T_{s-1}}\right) + \sum_{s=1}^{n} \frac{M \cdot A_s}{L}$$

Entsprechend ergibt sich als Beziehung für die optimale Losgrösse bei Mehrstufenfertigung und geschlossener Losweitergabe bei Nichtberücksichtigung der Transportkosten:

$$(97)\quad L = \sqrt{\frac{2 \sum A_s}{\sum k_s \left(\frac{1}{T_s} + \frac{1}{T_{s-1}}\right)}}$$

2.3142 Bei minimalem Zwischenlager

Für den von uns oben erörterten Fall des minimalen Zwischenlagers verändern sich im Ansatz von Gleichung (92) die Lagerkosten, wenn von den Transportkosten zunächst wieder abgesehen wird. Die durchschnittliche Lagermenge ist gemäß (78) um den Taktdifferenzfaktor gemindert; die erforderliche Lagerzeit ist hier für eine Station gleich der längeren Bearbeitungszeit (dem kleineren Takt) der beiden Folgestationen, vgl. Figur 13 und 14. Also:

$$(98)\quad K_s = MS_s + \frac{L}{2}\left|\frac{T_s - T_{s-1}}{T_{max}}\right| k_s \frac{M}{T_{min}} + \frac{M}{L} A_s$$

Formt man wieder um und leitet nach L ab, so ergibt sich als Gleichung für die optimale Losgröße für eine Station bei minimalem Zwischenlager:

$$(99) \qquad L = \sqrt{\frac{2\, T_{min}\, A_s}{k_s \left| \frac{T_s - T_{s-1}}{T_{max}} \right|}}$$

Für mehrere Stationen sind wiederum die Kostengrößen über die Stationen zu summieren, damit eine gewichtete, einheitliche Gesamtlosgröße abgeleitet werden kann. Analog zu (96) wird dann (98) zu:

$$(100) \quad \sum_{s=1}^{n} K_s = \sum_{s=1}^{n} MS_s + \sum_{s=1}^{n} \frac{L}{2} \left| \frac{T_s - T_{s-1}}{T_{max}} \right| k_s \frac{M}{T_{min}} + \sum_{s=1}^{n} \frac{M}{L} A_s$$

Nach Differentation und Auflösung nach der gesuchten optimalen Losgröße für die Mehrstufenfertigung bei minimalem Zwischenlager ergibt sich:

$$(101) \qquad L = \sqrt{\frac{2 \sum A_s}{\sum_{(s;s-1)} \frac{k_s}{T_{min}} \left| \frac{T_s - T_{s-1}}{T_{max}} \right|}}$$

Vergleicht man (94) mit (99), optimale Losgröße für eine Station, und (97) mit (101), optimale Losgröße für eine Stationenfolge, so erkennt man, daß für die geschlossene Losweitergabe (vgl. Figur 11) kleinere Losgrößen optimal sind, dagegen die Verzahnung der Losanfänge (gemäß Figur 10 und 13) zu höheren Losgrößen führt; denn bei geschlossener Losweitergabe (94) bzw. (97) ist der Nenner unter der Wurzel größer als bei Losteilung (99) bzw. (101). Folglich ist (94) < (99) und (97) < (101).[95]

---

95) Das wird deutlich, wenn man den Nenner in (99) bzw. (101) umformt und vergleichbar macht mit dem Nenner in (94) bzw. (97). Hierzu müssen die zwei möglichen Fälle $T_s > T_{s-1}$ und $T_s < T_{s-1}$ unterschieden werden. Es gilt für

Dieser einfache Vergleich gilt nur, wenn sowohl bei geschlossener Losweitergabe als auch bei einer Losteilung die gleichen Transportkosten entstehen. Ist das nicht der Fall, entstehen also durch die Losteilung zusätzliche Transportkosten, so sind die Gleichungen (93) bis (97) und (98) bis (101) analog zu (89) und (90) um die Transportkosten zu erweitern.

Bei geschlossener Losweitergabe vergrößern sich die (fixen) Kosten je Los A_s um die Transportkosten für einen Transport C_s. In den Gleichungen (93) bis (97) muß es also statt A_s jeweils $(A_s + C_s)$ heißen, und die Beziehung für die optimale Losgröße bei Mehrstufenfertigung und geschlossener Losweitergabe wird:

(97a) $$L = \sqrt{\frac{2 \cdot (A_s + C_s)}{2k_s\left(\frac{1}{T_s} + \frac{1}{T_{s-1}}\right)}}$$

Bei minimalem Zwischenlager und Losteilung gibt es nicht nur soviel Transporte wie Lose, wie oben; vielmehr entstehen die Transportkosten C_s, die als in diesem Rahmen unabhängig von der Transportmenge unterstellt seien, je Los mehrmals, und zwar gemäß (86) $\frac{\log L}{\log \frac{T_{max}}{T_{min}}}$ mal. Gleichung (100) erweitert sich also zu:

---

95) Forts. ... positive T-Werte, die von der Sache her hier nur in Frage kommen:

Für den Fall $T_s > T_{s-1}$, d.h. $T_{min} = T_{s-1}$, $T_{max} = T_s$:

$$\frac{1}{T_{s-1}}\left(\frac{T_s - T_{s-1}}{T_s}\right) = \frac{1}{T_{s-1}}\left(1 - \frac{T_{s-1}}{T_s}\right) = \frac{1}{T_{s-1}} - \frac{1}{T_s} < \frac{1}{T_{s-1}} + \frac{1}{T_s}$$

Für den Fall $T_s < T_{s-1}$, d.h. $T_{min} = T_s$, $T_{max} = T_{s-1}$:

$$\frac{1}{T_s}\left(\frac{T_{s-1} - T_s}{T_{s-1}}\right) = \frac{1}{T_s}\left(1 - \frac{T_s}{T_{s-1}}\right) = \frac{1}{T_s} - \frac{1}{T_{s-1}} < \frac{1}{T_s} + \frac{1}{T_{s-1}}$$

$$(100a)\quad \sum_{s=1}^{n} K_s = \sum_{s=1}^{n} MS_s + \sum_{s=1}^{n} \frac{L}{2} \left| \frac{T_s - T_{s-1}}{T_{max}} \right| k_s \cdot \frac{M}{T_{min}^{(s;s-1)}} + \sum_{s=1}^{n} \frac{M}{L} A_s + \sum_{s=1}^{n} \frac{M}{L} C_s \frac{\log \frac{L}{T_{max}}}{\log \frac{T_{max}}{T_{min}^{(s;s-1)}}}$$

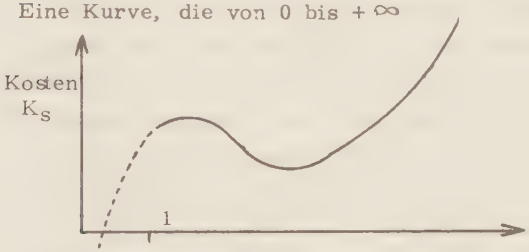
Nach L abgeleitet ergibt sich (für das neue Glied ist die Quotientenregel anzuwenden):

$$(100b)\quad \sum_{s=1}^{n} K'_s = \sum_{s=1}^{n} \frac{Mk_s}{2\, T_{min}} \left| \frac{T_s - T_{s-1}}{T_{max}} \right| - \sum_{s=1}^{n} \frac{MA_s}{L^2} + \sqrt{\sum_{s=1}^{n} \frac{MC_s \cdot \log e}{\log \frac{T_{max}}{T_{min}}} \cdot \frac{2}{L} - \sum_{s=1}^{n} \frac{M \cdot C_s \log L}{\log \frac{T_{max}}{T_{min}}} \cdot \frac{2}{L^2}}$$

wobei e die Basis der natürlichen Logarithmen ist, e = 2,718... . Setzt man, um das Minimum zu bestimmen, $K'_s = 0$, so zeigt sich, daß in dieser Gleichung L nicht mehr isoliert werden kann, weil das letzte Glied im Zähler und im Nenner die Größe L enthält. Diese fehlende explizite Lösung ergibt sich offenbar daraus, daß Gleichung (100a) erst durch die Konstanten hinreichend charakterisiert ist. Das zweite Glied sorgt zwar wegen der Lagerkosten k_s eindeutig für eine möglichst kleine Losgröße, das dritte Glied wegen der losfixen Kosten A_s umgekehrt für eine hohe Losgröße, das vierte neue Glied ist dagegen in seiner Auswirkung offen, es kommt auf das Verhältnis der Konstanten an, in welcher Richtung es wirkt. Für den Zahlenfall kann eine Lösung durch Iteration erreicht werden, indem L-Werte in (100b) eingesetzt werden solange, bis $K'_s = 0$ wird. Dabei sind zwei Lösungen möglich, da man in (100b) eine Parabel mit einer logarithmischen Kurve schneidet.[96] Überlegt man sich,

96) Von entarteten Fällen, in denen sich diese beiden Kurven nur in einem Punkt berühren oder gar nicht schneiden, kann hier abgesehen werden. Ein sinnvoll formuliertes ökonomisches Problem hat stets eine Lösung. Die Degenerationsfälle würden nur darauf hinweisen, daß das angenommene Problem nicht besteht oder falsch formuliert ist. Für gegebene Werte der Konstanten läßt sich das ohne Schwierigkeiten nachprüfen.

wie die Funktion (100a) verlaufen wird, wenn L zwischen den theoretisch von der Sache her nur möglichen Werten + 1 bis + ∞ variiert, so erkennt man, daß die Funktion einen Verlauf wie in Figur 15 haben muß; dabei ist (sachlich zutreffend) vorausgesetzt, daß die Konstanten nur positiv sein können. Eine Kurve, die von 0 bis + ∞



Figur 15

im ersten Quadranten verläuft und zwei Extrempunkte hat, kann nur zuerst ihr Maximum und dann ihr Minimum haben. Folglich ist von den beiden möglichen Lösungen für die Gleichung (100b) die höhere Lösung die gesuchte optimale kostenminimale Losgröße. Man wird, wenn man keinen Überblick über den praktischen Fall hat, die Iteration bei hohen L-Werten beginnen und zur Kontrolle mit (im allgemeinen) unrealistisch niedrigen L-Werten wiederholen. (Es ist in der Regel zu erwarten, daß das auszuschließende Maximum schon bei L = 1 liegt). Für die häufige und wiederholte Anwendung von Gleichung (100a) und (100b) empfiehlt sich auch die nomographische Lösung.

Für diese erst vollständige Umschreibung unseres Problems durch die Einbeziehung der Transportkosten läßt sich also leider kein so einleuchtender Vergleich der beiden Fälle (geschlossene Losweitergabe - geteilte Losweitergabe bei minimalem Zwischenlager) ziehen. (Um eine Interpretation des Ergebnisses zu erleichtern, hatten wir deshalb den Fall ohne Einbeziehung der Transportkosten trotz seiner Unvollständigkeit abgeleitet). Die beiden ersten Glieder der Lösungsgleichung (100b) sind die gleichen wie in (99), dem Fall ohne Einbe-

ziehung der Transportkosten. Die beiden letzten Glieder unterscheiden sich lediglich durch die beiden Logarithmen log e und log L und haben unterschiedliches Vorzeichen. Kann man annehmen, daß die (zunächst unbekannte) optimale Losgröße im Realfall auf Grund der Kostenkonstanten größer sein wird als e = 2,718.., so bedeutet das, daß das letzte Glied von (100b) das vorletzte Glied überkompensieren wird. Da bei einer Auflösung von (100b) nach L^2 das letzte Glied additiv zum zweiten tritt, wird daher in diesem Falle die optimale Losgröße bei Einbeziehung der Transportkosten höher sein als bei ihrer Vernachlässigung. Für die Gültigkeit dieser Annahme spricht sehr viel. Es sind nur Ausnahmefälle denkbar, in denen die Transportkosten im Verhältnis zu den losfixen Kosten so hoch sind oder die Lagerkosten eine solche Bedeutung im Vergleich zu den anderen Kosten haben, daß die optimale Losgröße extrem klein wird.

Es kann also zusammengefaßt werden: Schließt man in die Betrachtungen die Transportkosten ein, so erhöht sich sowohl bei geschlossener Losweitergabe als auch in der Regel bei minimalem Zwischenlager und Losteilung die optimale Losgröße. Wie groß in beiden Fällen diese Erhöhung ist, läßt sich, da der Fall bei Losteilung sich nur noch implizit lösen läßt, nicht allgemein sagen und vergleichen, das hängt also vom Spezialfall und seinen Konstanten ab.

Um das Ausmaß dieser Ergebnisse zu illustrieren, soll das der Figur 10 (S. 110) zugrunde gelegte Beispiel ausgebaut werden. Es seien die sieben Stationen mit den angegebenen Takten vorhanden. Die Lagerkosten k_s, die fixen Einrichte- und Prüfkosten je Los A_s und die Transportkosten je Transport C_s seien, wie in der folgenden Tabelle aufgeführt:

Station Nr.	1	2	3	4	5	6	7
Takt T_s (Stück/h)	10	15	12	20	15	12	25
Einrichtekosten A_s (DM/los)	30	40	30	40	35	20	50
Lagerkosten k_s (DM/Stück · h)	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07
Transportkosten C_s (DM/Transporte)	3	3	3	3	3	3	3

Läßt man zunächst wieder die Transportkosten außer acht, setzt man also die Werte T_s, A_s und k_s in die Gleichung (97) bzw. (101) ein, so erhält man als optimale Losgröße bei geschlossener Losweitergabe ganzzahlig aufgerundet 115 Stück, bei Verzahnung der Losanfänge 234 Stück. Der Unterschied ist also beträchtlich. Die nur halb so große Losgröße bei geschlossener Losweitergabe führt dementsprechend zu höheren Gesamtkosten. Soll eine Gesamtmenge von 1000 Stück hergestellt werden und setzt man die Losgröße, um auf teilbare Zahlen zu kommen, auf 125 Stück bzw. 250 Stück fest, so betragen die Lager- und Einrichtekosten insgesamt bei geschlossener Losweitergabe entsprechend (96) 4302 DM, bei Verzahnung der Losanfänge dagegen entsprechend (100) nur 2101 DM. Es zeigt sich also, daß - unabhängig von den zunächst nicht berücksichtigten Transportkosten - die geschlossene Losweitergabe wegen der Ausdehnung der Durchlauf- und Lagerzeit zu erheblichen Mehrkosten führen kann. Die Unterschiede zwischen den Losgrößen und den Kosten werden geringer, wenn die Einrichtekosten A_s im Verhältnis zu den Lagerkosten k_s größer werden, und umgekehrt.

Für den Fall mit Einschluß der Transportkosten sind die Unterschiede in den Gesamtkosten nicht so groß, da sich bei Los-

teilung die zusätzlichen Transportkosten stärker auswirken. Für geschlossene Losweitergabe ergibt sich: Optimale Losgröße gemäß (97a): 120 Stück; rundet man wieder, um auf teilbare Zahlen zu kommen, auf 125 Stück auf, so sind die entsprechenden Gesamtkosten 4470 DM. Bei Losteilung und minimalem Zwischenlager erhält man durch versuchsweises Einsetzen von L_i-Werten in (100b) für die optimale Losgröße: 337 Stück. Rundet man auf 333 Stück ab, so sind die entsprechenden Gesamtkosten gemäß (100a) 3186 DM. Der Unterschied zwischen den optimalen Losgrößen wird also noch größer, der Unterschied zwischen den Gesamtkosten dagegen kleiner, ist aber im Beispiel immer noch bemerkenswert groß. Sind die Transportkosten im Verhältnis zu den losfixen Kosten A_s höher, wird der Unterschied in den Gesamtkosten kleiner werden.

Das Ergebnis ist also, daß die Art des Fertigungsdurchflusses (geschlossene Losweitergabe - geteilte Losweitergabe) nicht nur die Durchlaufzeit und damit die Zwischenlagerzeiten und -kosten und Transportkosten bestimmt (was ohne weiteres auch plausibel und als Erkenntnis sicherlich nicht neu ist), sondern daß die optimale Losgröße ihrerseits hiervon beeinflußt wird. Die Festlegung der Losgrößen im Betrieb muß also abhängig davon gemacht werden, ob eine Transportteilung der Lose in der oben beschriebenen Weise möglich ist oder nicht und wie hoch im Verhältnis zu den Lagerkosten die Transportkosten sind; die optimale Losgröße verändert sich dementsprechend. In jedem Falle kann dann die eine Komponente des dem ganzen Sachverhalt ja zugrundeliegenden Gesetzes der Massenproduktion[97], Verringerung der Stückkosten wegen der

97) K. Bücher: "Das Gesetz der Massenproduktion", Zeitschrift für die gesamte Staatswissenschaft, Bd. 66 (1910), S. 429-444

Degression des Fixkostenanteils bei höheren Losgrößen, auftreten. Auch seine zweite Komponente, Verwendung einer anderen Fertigungstechnik, die - eben bei höheren Losgrößen - zu niedrigerem Fertigungsstückkostenniveau (und damit hier auch noch zusätzlich zu einer Verminderung der Lagerkosten je Stück und Zeit) führt, kann ihre Bestätigung finden. Aus diesen Gründen kommt also der Frage der Transportteilung und Verschachtelung der Losanfänge besondere Bedeutung zu; denn die Verbilligungen ergeben sich dann, obgleich jeweils die gleiche insgesamt in der Planungsperiode zu fertigende Menge zugrundegelegt ist.

2.315 Zusammenfassung

Aus dem Erörterten ergibt sich also:

1. Auf die für die industrielle Mehrstufenfertigung wesentlichen Zwischenlager und somit auf die Durchfluß- und Produktionsdauer hat die Losgröße einen bestimmenden Einfluß; und zwar insbesondere dann, wenn in den aufeinanderfolgenden Stationen die Maschinen unterschiedliche Bearbeitungsgeschwindigkeiten haben und die Lose geschlossen über eine Maschine laufen und nicht gespalten werden sollen, weil dadurch zwangsläufig Wartezeiten entstehen müssen für Teile, die schon bearbeitet sind, aber noch nicht zur nächsten Station weitergegeben werden können.

2. Diese Wartezeiten werden am größten, wenn jedes Los geschlossen, erst wenn es in einer Station vollständig fertig ist, zur Folgestation weitergegeben wird. Alle Teile eines Loses lagern dann in der Bearbeitungsstation mindestens für die Dauer der Bearbeitungszeit des gesamten Loses.

3. Die geschlossene Fertigung eines jeden Loses auf nur einer Maschine setzt dieses Verfahren aber nicht notwendig voraus. Ohne daß die Lose beim Übergang zwischen zwei Stationen zerreißen oder sich vollständig kumulieren, ist es möglich, in der Folgestation schon eher mit dem Los zu beginnen, indem mehrmals Teile der Lose weitergegeben werden. Theoretisch hängen die Termine und Mengen der zu transportierenden Stücke ausschließlich von dem Verhältnis der Bearbeitungsgeschwindigkeiten in den aufeinanderfolgenden Stationen ab. Sollen die Wartezeiten minimiert werden, so sind, wenn eine langsame Station auf eine schnellere zuarbeitet, zunehmend fallende Transportmengen und kürzere Transportabstände erforderlich, im anderen Falle umgekehrt.

4. Durch die Losteilung entstehen zusätzliche Transportkosten. Trotzdem kann es gerechtfertigt sein, sich für die Losteilung zu entscheiden. Es kann dann zu höheren Losgrößen übergegangen werden. Die Transportteilung wird dadurch noch erleichtert und es sind weniger Dispositionsakte erforderlich, was zu einer Beruhigung (u. U. sogar zum Übergang zu anderer und wirtschaftlicherer Technik) der Fertigung beitragen dürfte.

5. Für diese - im Prinzip bekannten oder ohne weiteres einleuchtenden - Zusammenhänge wurden oben die quantitativen Beziehungen (und Grenzen) dargestellt. Sie gelten nicht, wenn die Fertigung rein verfahrensmäßig in Form der Fließfertigung vor sich geht, wo die Lose zur zeitlichen Harmonisierung entsprechend den Taktrelationen auf mehrere Maschinen aufgespalten werden.

Wie weit sich diese Teilung der geschlossen zu fertigenden Lose für den Transport im Anwendungsfall betriebstechnisch

verwirklichen läßt, ist natürlich eine Tatfrage. Durch die Transportteilung wird in jedem Falle eine strengere Termindisziplin in den Fertigungsabteilungen erforderlich. Diese wird sich nur schwer einhalten lassen, wenn die Produktion hauptsächlich in der Form der Werkstattfertigung vor sich geht, das Produktionsprogramm viele Teile umfaßt, deren Bearbeitungsreihenfolge sehr unterschiedlich ist und die die Werkstätten nur teilweise belasten, und die Losgrößen klein sind. Der freien Disposition der Meister muß dann mehr Platz gelassen werden, und der Erfolg durch die Verringerung der Zwischenlager kann leicht durch ungleichmäßige Belastungen der einzelnen Werkstätten und zusätzliche Dispositionskosten wieder aufgehoben werden. Vielfach hält man in den Fällen verflochtener Werkstattfertigung bewußt in den Werkstätten gewisse Zwischenlager, die noch größer als die Summe aller in Bearbeitung befindlichen Lose ist, wie sie sich bei geschlossener Losweitergabe ergibt, um durch ein solches Puffer eine gleichmäßige Beschäftigung auch in den einzelnen Werkstätten zu ermöglichen. Dann entfällt die Lenkungseigenschaft des hier Erörterten; als Kontrollrechengröße für den Vergleich Mindestzwischenlager - tatsächlich gehaltene Zwischenlager und Mindestdurchlaufzeit - tatsächliche Durchlaufzeit behalten unsere Überlegungen aber immer noch ihren Wert.

2.32 Durchfluß und Maschinenbelegung

2.321 Problemstellung

Durch die Wahl der Losgröße wird, wie im vorigen Abschnitt gezeigt wurde, eine Mindestdurchlaufzeit festgelegt, die nur dann realisierbar ist, wenn die Folgemaschinen zu den entsprechend erforderlichen Terminen nicht anderweitig belegt sind. Das eigentliche zeitliche Planungsproblem bei der Ablaufplanung, nämlich die Lose so einzugeben, daß die aufeinanderfolgenden Maschinen bzw. Bearbeitungsstätten frei sind, wenn die Bearbeitung theoretisch begonnen werden könnte, die Maschinen andererseits aber nicht unnötig lange unbeschäftigt sind, ist damit noch nicht gelöst. Worum geht es hier?

Zur Erläuterung sei ein Beispiel konstruiert, in dem mehrere Produkte (P_1, P_2, P_3, P_4, P_5) mehrere Maschinen (M_1, M_2, M_3) durchlaufen müssen. Die Reihenfolge der Maschinen M_m für die Bearbeitung der Produkte P_n liegt technisch fest. Sie läßt sich in einer Tabelle angeben und zusammenfassen:

Bearbeitungsreihenfolge

	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5
M_1	1	2	1	-	1
M_2	2	1	2	1	2
M_3	3	3	-	2	3

Die Bearbeitungszeit je Stück des Produkts P_n auf der Maschine M_m ist ebenfalls gegeben. Sie sei für das Beispiel wie folgt angenommen:

Bearbeitungszeit in Minuten je Stück

	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5
M_1	6	3	4	0	8
M_2	5	8	5	8	6
M_3	7	10	0	10	12

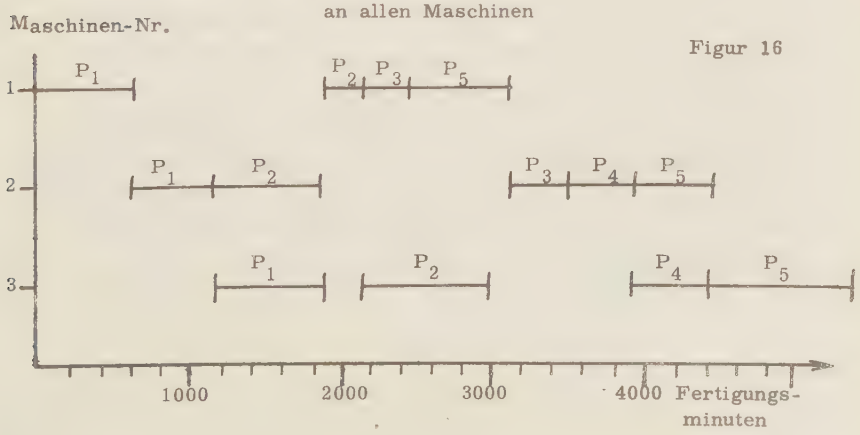
In gleicher Weise können die Einrichtzeiten der Maschinen für die Produkte gegeben sein. Hier seien sie, da sie als Konstanten zunächst sekundär sind, der Einfachheit halber für alle Produkte und Maschinen gleich mit 30 min. angenommen.

Für einen gegebenen Produktions-Mengen-Plan für die Planungsperiode, z.B.

Produkte	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5
Mengen (Stück)	100	80	70	50	80

läßt sich der zeitliche Durchfluß durch die Maschinen ermitteln und graphisch darstellen. Hierfür bedarf es aber einiger vorausgehender Entscheidungen über die Art des Durchflusses (Reihenfolge der zu produzierenden Produkte an der ersten oder letzten Maschine oder auch einer Zwischenmaschine, zulässige Vertauschbarkeit in der Reihenfolge bei den nicht in dieser Weise festgelegten Maschinen). Je nach dieser Wahl werden Durchlaufzeit und Maschinenstillstandzeiten bzw. Produktstillstandzeiten (Zwischenlager) unterschiedlich sein. Legt man im Beispiel die Reihenfolge an der ersten Maschine mit $P_1\ P_2\ P_3\ P_4\ P_5$ fest und fordert, daß diese Reihenfolge an allen Maschinen beibehalten wird, so ergibt sich, wenn der Einfachheit halber geschlossene Losweitergabe unterstellt wird, folgendes Durchflußbild:

Plan 1 Reihenfolge $P_1\ P_2\ P_3\ P_4\ P_5$ an allen Maschinen



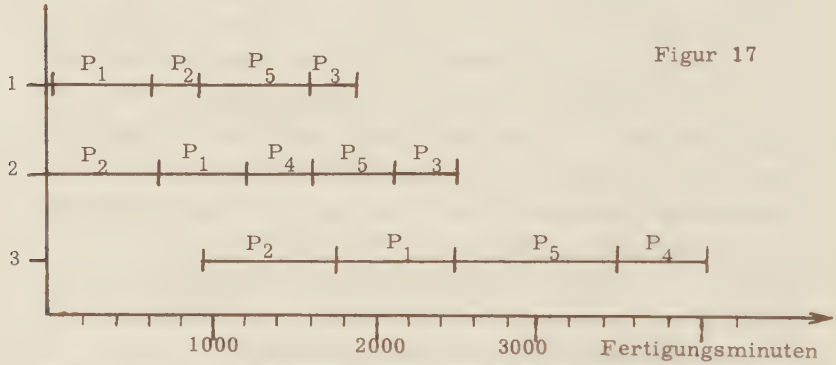
Figur 16

Ein solcher Ablaufplan enthält Lücken in der Belegung der Maschinen (im Beispiel insgesamt 2 200 Fertigungsminuten), die offenbar durch eine andere Anordnung der Produkte ganz oder weitgehend geschlossen werden könnten. (Die "Treppen" am Anfang und am Schluß sind dabei außer Betracht gelassen; das Beispiel zeigt nur einen Ausschnitt ohne die sich durch die fortlaufende Produktion von selbst ergebende Verzahnung, durch die diese "Treppen" weitgehend ausgefüllt werden.)

Beispielsweise würde ein anderer Ablaufplan sein:

Plan 2 Reihenfolge $P_2\ P_1\ P_5\ P_4\ (P_3)$ an der letzten Maschine

Maschinen-Nr.



Figur 17

Bei diesem Plan 2 wurde für die letzte Maschine die Reihenfolge festgelegt (P_2, P_1, P_5, P_4), für die anderen Maschinen dagegen freigestellt, und es zeigt sich, daß zum Auffüllen der Lücken eine unterschiedliche Reihenfolge an den Maschinen zweckmäßig bzw. notwendig ist und daß damit zwangsläufig die Maschinenwartezeiten durch Produktwartezeiten (Zwischenlager, die nicht losgrößenabhängig sind, vgl. S. 102 ff.) ersetzt werden mußten. Über die Unterschiede beider Pläne gibt die folgende Tabelle Auskunft:

Vergleich der beiden beispielhaften Durchflußpläne

	Lücken (Maschinenwartezeiten in Fert. Min.)	Zwischenlager (Produktwartezeiten in 1000 Fert.-Min.)			Gesamtzeitspanne in Fertigungsminuten
		1. Überg. Masch. 1-2	2. Überg. Masch. 2-3	Σ	
Plan 1	2 200	18,4	1,6	12,0	4 700
Plan 2	0	16,4	179, 9	196,0	4 000

	Zeitverschiebung zwischen Fertigungsanfang bzw. -ende zwischen den Maschinen ("Treppen"zeiten) in Fertigungsminuten				
	Anfang		Ende		
	1. Überg. Masch. 1-2	2. Überg. Masch. 2-3	1. Überg. Masch. 1-2	2. Überg. Masch. 2-3	Σ
Plan 1	630	1160	1010	1660	4 460
Plan 2	40	940	1520	2100	4 600

Plan 1 hat hohe Maschinenstillstandzeiten und kleine Zwischenlager und eine ungefähr gleichmäßige Zeitverschiebung zwischen den Belastungen der Maschinen insgesamt. Plan 2 hat keine Maschinenstillstandzeiten, aber höhere Zwischenlager und eine über den Gesamtzeitraum ungleichmäßige Belastung der Maschinen, die einen Anschluß an die benachbarten Produktionspläne schwieriger macht. Die Gesamtdurchlaufzeit aller Produkte ist dafür niedriger als in Plan 1. Andere Pläne, die sich für den gleichen Sachverhalt noch in sehr großer Zahl (s. weiter unten) aufstellen ließen, würden zu entsprechend anderen Relationen dieser Werte führen. Geht man davon aus, daß die Lose nicht geschlossen weitergegeben werden (wie in unserem Beispiel), sondern gemäß den Erörterungen oben (Abschnitt 2.31, S. 99 ff.) für den Transport zerrissen werden, so ergeben sich im Prinzip ähnliche Durchflußpläne mit lediglich niedrigerem Niveau der Gesamtdurchlaufzeit und der Produktwartezeiten (Zwischenlager, die über das Maß der losgrößenabhängigen Lager hinausgehen).

Das Problem der Durchlaufplanung zeigt sich aus diesem Beispiel deutlich: Den Maschinenwartezeiten und den Produktwartezeiten kommen Kostenwerte zu, und es gilt, für einen gegebenen Mengenplan und die gegebenen technischen Koeffizienten einen solchen Durchlaufplan, d.h. eine solche Anordnung der Lose je Maschine zu finden, daß die Summe dieser gegenläufigen Größen insgesamt für alle Maschinen ein Minimum wird. Dieses Ziel läßt sich annähern durch die Minimierung der Gesamtdurchlaufzeit, denn sie wird erreicht, wenn keine Lücken im Ablauf bestehen, was seinerseits Vorbedingung für niedrige Maschinenstillstandzeiten und für niedrige Zwischenlager insgesamt ist. Es erübrigt sich, das kompliziertere Abwägungs-Ziel zugrunde zu legen und zu formulieren, wenn sich herausstellt, daß hinreichende Lösungen des Ablaufproblems schon mit der einfacheren (Näherungs-)Zielformulierung kaum praktikabel sind.

Wieviel Durchlaufpläne (Z) gibt es für n Produkte und m Maschinen? Wenn die Reihenfolge der n Produkte für keine Maschine festgelegt wird, ist

(102) $$Z = (n!)^m$$

Denn es sind im Prinzip n! mögliche Permutationen, d.h. Reihenfolgen der Produkte an einer Maschine möglich, und es können an jeder der m Maschinen diese möglichen Reihenfolgen vorkommen und mit allen anderen Reihenfolgen an den anderen Maschinen kombiniert werden.[98] Das bedeutet, daß die Zahl der möglichen Durchlaufpläne ungeheuer groß ist (z.B. bei n=5 Produkten und m=3 Maschinen gibt es $Z = (5!)^3 = (2 \cdot 3 \cdot 4 \cdot 5)^3 = (120)^3 =$ 1 728 000 Ablaufpläne.)

98) Das Problem ähnelt der bekannten Aufgabe im Fußball-Toto, wo allerdings von den n=3 Möglichkeiten im Gegensatz zu unserem Problem für jedes m (Fußballspiele) nur eine ausgewählt werden muß, sodaß die Permutationen innerhalb der n wegfallen.

2.322 Exakte Planungsverfahren

Für das Problem gibt es in dieser allgemeinen Formulierung kein Lösungsverfahren, das - ähnlich wie bei einem linearen Programm die Simplex-Methode - unter der Vielzahl der Möglichkeiten aufgrund des Zielkriteriums (Kosten) in einer beschränkten Zahl von Lösungsschritten ein Optimum ermittelt. ("Here we have an unsolved problem"[99])[100]. Will man das Problem exakt lösen, bleibt daher theoretisch nichts anderes übrig, als alle Möglichkeiten durchzuprobieren und die beste auszuwählen. Dieser Weg ist wegen der übergroßen Zahlenmengen praktisch ungangbar.

Gelöst ist lediglich der Fall von n Produkten und 2 Maschinen bzw. umgekehrt 2 Produkten und m Maschinen, wobei für alle Produkte die Bearbeitungsreihenfolge gleich sein muß, wie die Überlegungen von Johnson[101][102] und Mitten[103] zeigen.

Gegeben sind 2 Maschinen (M_1 und M_2), auf denen n Produkte (P_1, P_2... P_n) (im Beispiel n=6) zu bearbeiten sind, und zwar

---

99) A. Vaszonyi: Scientific Programming ..., a.a.O., p. 416

100) Es sei angemerkt, daß mit einem solchen System nicht etwa ein System zur analytischen Lösung der Fußball-Toto-Aufgabe begründet werden könnte, denn dort ist kein Zielkriterium für die Auswahl der Kombinationen der n vorhanden, diese sind vielmehr im Prinzip zufallsverteilt und nicht wie im vorliegenden Problem bewertet und danach auszuwählen.

101) S.M. Johnson: "Optimal Two- and Three-Stage-Production Schedules with Set-Up Time Included", Naval Research Logistics Quaterly, Vol. 1 (1954), pp. 61-68, zitiert nach Anmerkung 102, vgl. auch Anmerkung 105.

102) S.M. Johnson: "Discussion: Sequencing n Jobs on two Machines with Arbitrary Time Lags", Management Science, Vol. 5 (1959), pp. 299 - 303

103) L.G. Mitten: "Sequencing n Jobs on two Machines with Arbitrary Time Lags", Management Science, Vol. 5 (1959), pp. 293-298.

alle in der Reihenfolge M_1, M_2. Die Bearbeitungszeiten eines jeden Produkts auf jeder Maschine seien bekannt und hätten für ein Beispiel die in der Tabelle aufgeführten Werte (Zeiteinheiten):

	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6
M_1	9	5	9	6	4	7
M_2	8	2	5	9	9	6

Die folgende Rechenregel führt in diesem Falle zur optimalen Reihenfolge, d.h. zu einer Reihenfolge, bei der die Gesamtdurchlaufzeit minimiert ist[104]:

1. Wähle die kürzeste Bearbeitungszeit aus.
2. Betrifft die kürzeste Bearbeitungszeit die erste Maschine, stelle das zugehörige Los an den Anfang; betrifft sie die zweite Maschine, stelle das zugehörige Los an den Schluß.
3. Wiederhole das Verfahren mit den übrig gebliebenen Losen und stelle das gewählte Los an die erste oder zweite bzw. vorletzte oder letzte Stelle.
4. Wiederhole das Verfahren entsprechend, bis die "Mitte" erreicht ist und alle Lose festgelegt sind.

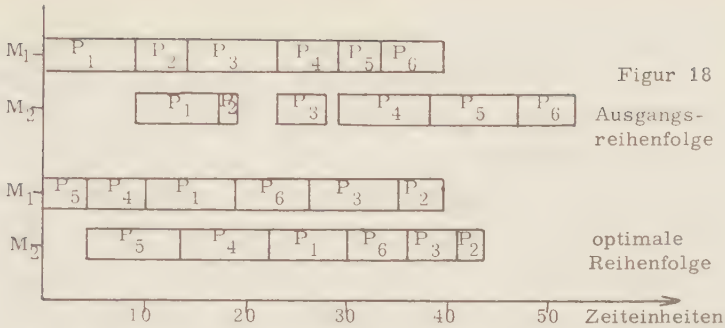
Für das Zahlenbeispiel ergibt sich daraus als optimale Reihenfolge:

$$P_5 \quad P_4 \quad P_1 \quad P_6 \quad P_3 \quad P_2$$

Diese Reihenfolge hat, wie sich aus Figur 18 ergibt, eine Gesamtdurchlaufzeit von 43 Zeiteinheiten, die Reihenfolge in der Nummernfolge P_1 P_2 P_3 P_4 P_5 P_6 z.B. dagegen eine Durchlaufzeit von 53 Zeiteinheiten (oder etwa 23% mehr).

---

104) Zum Beweis der Optimalität siehe Johnson, a.a.O. Anmerkung 101 und 102.



Figur 18

Auf den Fall mit 3 Maschinen und n Gütern (oder m Maschinen und 3 Gütern) läßt sich die Johnson-Regel nur noch unter besonderen Voraussetzungen erweitern; nämlich nur dann, wenn die kleinste von den auf der ersten oder letzten Maschine erforderlichen Bearbeitungszeiten nicht kleiner ist als die größte von den auf der zweiten Maschine erforderlichen Bearbeitungszeiten[105].

Sowohl der Zweier-Fall als auch der spezielle Dreier-Fall dürften praktisch nicht von großer Bedeutung sein. Da es für die Ansätze höherer Ordnung exakte Lösungsverfahren nach der Art der Johnson-Regel nicht gibt, muß man nach anderen exakten oder näherungsweisen Lösungen suchen, die Anspruch darauf erheben können, besser zu sein, als die bloße (graphische) Schätzung nach dem Augenschein, wie man sie in der Praxis für die Ablaufplanung häufig verwendet.

Für die optimale Lösung des Zweier-Falles hat Akers auch ein graphisches Lösungsverfahren angegeben[106], das auf vorangegangenen Überlegungen über gewisse logische Eigenschaften des

---

105) Vgl. Churchman, Ackoff, Arnoff, Introduction to Operations Research, New York 1957, p. 456, wo der in Anmerkung 101 angeführte, uns nicht zugängliche Aufsatz von Johnson teilweise wiedergegeben ist.

106) S. B. Akers: "A Graphical Approach to Production Scheduling Problems", Operations Research, Vol. 4 (1956), pp. 244-245

Maschinendurchlaufproblems basiert (s.a. weiter unten)[107]. Auch dieses Verfahren läßt sich nicht ohne starke Vereinfachungen für den allgemeinen Fall erweitern, weil es, wie alle graphischen Lösungsverfahren, den Nachteil hat, nur zweidimensionale - allenfalls dreidimensionale - Ansätze wiedergeben zu können. Szwarc[108] versucht eine Erweiterung des Zwei-Güter-m-Maschinen-Problems bei Akers auf das n·m Problem, indem er in die möglichen Zweier-Kombinationen auflöst; wenn z.B. n=4 Güter herzustellen sind, sind die optimalen Reihenfolgen für die Fertigung von Gut 1 und 2, Gut 1 und 3, Gut 1 und 4, Gut 2 und 3, Gut 2 und 4, Gut 3 und 4 (allgemein $\binom{n}{2}$ Programme) jeweils getrennt zu ermitteln. Aus diesen $\binom{n}{2}$ Programmen muß ein Programm für das n·m-Problem zusammengefaßt werden, und zwar so, daß die in den Einzelprogrammen angegebenen Reihenfolgen möglichst eingehalten werden. Es ergeben sich so mehrere mögliche Programme, aber eine geringere Zahl als theoretisch mit $(n!)^m$, weil eine Reihe von theoretischen Programmen wegen logischer Widersprüchlichkeit ausfällt (z.B. wenn für Gut 1 als Maschinenreihenfolge A - B und für Gut 2 B - A technisch vorgeschrieben ist, so ist eine Reihenfolge der Güter bei der Fertigung auf Maschine A 2 - 1 und Maschine B 1 - 2 unmöglich, jede Maschine würde auf die andere warten). Akers und Friedman[107] haben diese Einschränkung des Durchlaufproblems, die sich aus den technischen Vorschriften für die Maschinenreihenfolge der einzelnen Güter ergibt, näher untersucht; sie geben Rechenprinzipien für die Reduktion von Durchlaufprogrammen und für die Kontrolle auf offensichtlich gegenüber anderen Reihenfolgen schlechte Abläufe an. Diese Einschränkung bedeutet natürlich noch nicht die Lösung des Reihen-

---

107) S.B. Akers und J. Friedman: "A Non-Numerical Approach to Production Scheduling Problems", Operations Research, Vol. 3 (1955), pp. 429-442

108) W. Szwarc: "Solution of the Akers-Friedman Scheduling Problem", Operations Research, Vol. 8 (1960), pp. 782-788

folgeproblems; für die Lösung entsprechend dem Ansatz von Szwarc müssen alle möglichen Programme gerechnet und das beste (d.h. kürzeste) ausgewählt werden. Daß dies für größere, realistische Güteranzahlen n und Maschinenzahlen m noch immer große Zahlenmengen sind, läßt sich leicht denken. Wenn z.B. bei nur n=5 Gütern und m=3 Maschinen durch diese Einschränkungen 70% der prinzipiell aufstellbaren 1 728 000 Ablaufpläne (vgl. S. 134) wegfallen, so bleiben immer noch 518 400 mögliche Ablaufpläne. Immerhin kann im Einzelfall die Reduzierung des Problemumfanges durchaus so groß sein, daß die möglichen Restprogramme mit Hilfe eines noch im folgenden beschriebenen, ganzzahligen linearen Programms berechnet werden können.
Die Regeln von Akers und Friedman haben den Vorteil, daß sie die Reihenfolgen nur logisch (Boole'sche Algebra) betrachten, um die unmöglichen oder gegenüber anderen schlechteren Folgen zu eleminieren, die aber Maschinenzeiten noch nicht brauchen. Das ist von Bedeutung, wenn neue Produkte eingeplant werden sollen, deren Bearbeitungsreihenfolge zwar festliegt, deren Bearbeitungszeiten aber noch nicht genau bekannt sind. Diese werden hier erst gebraucht, wenn aus den restlichen möglichen Programmen das optimale ausgesucht werden soll.

Giffler und Thompson[109] definieren aus der Vielzahl der möglichen Ablaufpläne "aktive Produktionspläne". Dieses sind - zusammengefaßt wiedergegeben - Ablaufpläne, die nicht mehr dadurch verbessert und verkürzt werden können, daß Güter vorverschoben werden so, daß Lücken im Ablaufplan dadurch gefüllt werden, Betrachtet man nämlich einen beliebig aufgestellten Produktions-

109) B. Giffler und G.L. Thompson: "Algorithms for Solving Production-Scheduling Problems", Operations Research, Vol. 8 (1960), pp. 487-503

plan (z.B. Plan 1 auf S. 131), so ist es möglich, auf einer Maschine ein Gut in eine Lücke vorzuschieben, wenn (a) die Lücke groß genug ist und (b) innerhalb des durch die Verschiebung übers trichenen Zeitbereichs dieses Gut auf keiner Maschine zur Bearbeitung vorgesehen ist, also mit anderen Worten die technisch vorgegebene Maschinenreihenfolge für die Güter eingehalten bleibt (das gilt z.B. in Plan 1 auf S. 131 für P_5 auf Maschine 1). Mehrere mögliche Ablaufpläne münden so auf den gleichen "aktiven Produktionsplan". Giffler und Thompson entwickeln ein Rechenverfahren, das alle "aktiven Produktionspläne" ermittelt. Einer der "aktiven Produktionspläne" muß dann der optimale Ablaufplan sein, also der Plan, bei dem die kürzeste Bearbeitungszeit (einschließlich der Wartezeiten der Maschinen) erreicht wird. Das Problem wird dadurch vereinfacht, daß nicht sämtliche möglichen, sondern nur die "aktiven" Ablaufpläne berechnet werden müssen und nur unter diesen der optimale Plan ausgewählt werden muß. Der Rechengang hierfür ist aber dennoch zeitaufwendig, weil ja jede Bearbeitung auf jeder Maschine irgendwie verrechnet (d.h. zunächst mehr oder weniger willkürlich eingesetzt und dann aufgrund der im Rechenprogramm angegebenen Kriterien verschoben) werden muß. Giffler und Thompson empfehlen daher, entsprechend den bekannten Regeln der Stichprobentheorie, Zufallsstichproben aus willkürlich angenommenen Produktionsablaufplänen zu wählen und nur für diese die "aktiven Produktionspläne" auszurechnen. Die Zahl der zu berechnenden "aktiven Produktionspläne" richtet sich dann nach dem Umfang (Zahl der Produkte, Zahl der Maschinen) der Grundaufgabe und nach der geforderten Wahrscheinlichkeitsschranke, mit der der beste Produktionsplan aus der Stichprobe dem optimalen Produktionsplan nahe kommen soll. Der entsprechend erforderliche Umfang der Stichprobe wiederum wird von der zunächst unbekannten Verteilung der Pläne auf die

Durchlaufzeiten beeinflußt. Giffler und Thompson geben als Beispiel an[110]: 200 durch Stichprobe ausgewählte Produktionspläne (z.B. m=20 Maschinen n=100 Güter) zu errechnen, dauert auf einem großen Elektronenrechner in der Größe der IBM 704 etwa 20 Minuten. Über die Vorbereitungszeit und über den Repräsentationsgrad wird nichts ausgesagt. Der Repräsentationsgrad ist offenbar verschwindend gering (bei dem Beispiel m = 20 und n = 100 gibt es ja, vgl. weiter oben, $(100!)^{20}$ theoretische Produktionspläne, selbst wenn man von diesen durch die Reduktion auf "aktive Produktionspläne" 99,9 % wegfielen, so bleibt die Zahl von Plänen $0{,}001 \cdot (100!)^{20}$ noch unüberschaubar und im Praktischen unrechenbar groß, /ungefähr eine Zahl mit 2 100 Stellen/); es kann also nicht weit her sein mit der Wahrscheinlichkeit, den optimalen Produktionsplan zu treffen. Giffler und Thompson erwähnen auch ausdrücklich, daß sie über die Optimalität des besten ermittelten Planes nichts aussagen können, meinen nur, daß es sehr viel mehr Zeit kosten würde, eine gleiche Anzahl von Plänen von Hand durchzuprobieren. Dieser Vergleich ist aber nicht konsistent. Zwar wird es neben dem optimalen Ablaufplan (bzw. Plänen, denn es kann mehrere oder sogar viele gleich gute Lösungen geben) noch eine Reihe von Plänen geben, die für die praktische Anwendung völlig ausreichend dem optimalen Plan nahe kommen, und auf einen solchen Plan mag dann auch einer der Stichproben-Pläne leicht treffen. Immerhin ist aber die Frage zu stellen, ob nicht ein sehr viel einfacheres graphisches Lösungsverfahren wirtschaftlicher und vielleicht sogar schneller ist, bei dem die offenbar schlechten Ablaufpläne durch bloßen Augenschein auszumerzen sind (was Giffler und Thompson nicht in Betracht ziehen), so daß von vornherein einer der guten Pläne ermittelt

---

110) B. Giffler und G.L. Thompson: "Algorithms for ...", a.a.O., p. 500

werden kann und bei dem noch obendrein gewisse qualitative Erwägungen mit berücksichtigt werden können. Denn man wird zwar im Interesse einer geordneten Ablaufplanung innerhalb der Planungsperiode die Reihenfolge der Güter auf den Maschinen freistellen, trotzdem wird man wegen der Liefertermine gewisse Güter, wenn das ohne größere Verzögerung möglich ist, gegenüber anderen vorziehen. Als Fazit bleibt also, daß die exakte Lösung des Ablaufproblems auch über den Weg der Errechnung von "aktiven Produktionsplänen" nur für kleine Güter- und Maschinenzahlen möglich ist; doch hier liegt nicht die praktische Bedeutung des Problems.

Im Prinzip läßt sich das Ablaufproblem auch als lineares Programm formulieren. Bowman[111], Manne[112] und Wagner[113] haben derartige Ansätze versucht. Das im Beispiel oben auf Seite 130/131 erläuterte Problem kann danach etwa folgendermaßen allgemein formuliert werden:

Gegeben sind i=5 Güter (Lose) und j=3 Maschinen; die Güter haben jeweils die Maschinen in bekannter Reihenfolge zu durchlaufen und brauchen je Maschine bestimmte Bearbeitungszeiten a_{ij}. Sind k_i Stück vom Gut i herzustellen, so ist die erforderliche Arbeitszeit für das Gut i auf der Maschine j dafür $a_{ij} \cdot k_i$. Das Planungsproblem besteht nun darin, in den vorhandenen Zeitabschnitten t=1...T (z.B. Stunden) die Güter so den Maschinen zuzuordnen, daß die weiter unten formulierten Nebenbedingungen (geschlossene Fertigung der Gütermengen auf einer Maschine während einer Zeiteinheit) eingehalten wer-

111) E.H. Bowman: "The Schedule-Sequencing Problem", Operations Research, Vol. 7 (1959), pp. 621-624.

112) A.S. Manne: "On the Job Shop Scheduling Problem", Operations Research, Vol. 8 (1960), pp. 219-223

113) H. Wagner: "An Integer Linear Programming Model for Machine Scheduling", Naval Research Logistics Quarterly,

den und die Gesamtarbeitszeit ein Minimum wird. Als Variable des Problems sind Größen x_{ijt} zu bilden; diese bedeuten: Das Gut i ist auf der Maschine j im Zeitabschnitt t zu fertigen oder nicht. Die Variablen können also nur den Wert 0 oder 1 annehmen. In einer Formel läßt sich diese Bedingung zweckmäßig so ausdrücken:

$$X_{ijt} = X_{ijt}^{2} \qquad \begin{matrix} i=1\ldots n \\ j=1\ldots m \\ t=1\ldots T \end{matrix} \tag{103}$$

Folgende Nebenbedingungen bestehen:

Die erforderlichen Zeiten für die Fertigung der Menge k_i des Gutes i auf der Maschine j müssen eingehalten werden, d.h.

$$\sum_{t=1}^{T} x_{ijt} \geq a_{ij} k_i \qquad \begin{matrix} i=1\ldots n \\ j=1\ldots m \end{matrix} \tag{104}$$

Die Größen t und a_{ij} müssen dabei natürlich in der gleichen Dimension oder entsprechend korrigiert eingesetzt werden.

Während des Zeitabschnitts t darf auf einer Maschine j höchstens ein Gut i zur Fertigung vorgesehen werden, also:

$$\sum_{i=1}^{n} x_{ijt} \leq 1 \qquad \begin{matrix} j=1\ldots m \\ t=1\ldots T \end{matrix} \tag{105}$$

Die technisch gegebene Maschinenreihenfolge für die Güter muß eingehalten werden, oder, anders ausgedrückt, keine Maschine darf zu einem Zeitabschnitt für ein Gut i vorgesehen werden, bevor nicht in früheren Zeitabschnitten die erforderliche Bearbeitung auf der Vormaschine beendet ist. Also:

$$a_{ij} \cdot k_i \cdot x_{i(j+r)t} \leq \sum_{t=1}^{t-1} x_{ijt} \qquad \begin{matrix} \text{für alle} \\ t=1\ldots T \\ i=1\ldots n \\ j=1\ldots m \end{matrix} \tag{106}$$

---

113) Forts.: ... Vol.6 (1959), pp.131-140 (zitiert nach R. Sisson, "Sequencing Theory", Anmerkung 118)

r ist gleich 1, wenn alle Maschinen j vom Gut i nacheinander beansprucht werden; ist das nicht der Fall, ergibt sich r aus der für das Gut i gegebenen Maschinenreihenfolge und dem (willkürlichen) Nummerierungssystem der Maschinen j als Differenz zwischen den Nummern jeweils zweier Folgemaschinen.

D.h.: Wenn für das Gut i $a_{ij}k_i$ Zeitabschnitte zur Fertigung auf der Maschine j erforderlich sind, so muß, wenn das Gut auf der Folgemaschine j+r gefertigt werden soll, $x_{i(j+r)t}$ also 1 sein soll, die Summe der bisher verbrauchten Zeitabschnitte größer oder mindestens gleich sein der Zahl der für die Bearbeitung bis einschließlich auf der Maschine j erforderlichen Zeitabschnitte, sonst ist offenbar die Bearbeitung vor der Maschine j+r nicht beendet.

Diese Beschränkungen (106) sichern noch nicht, daß die einzelnen Arbeitsgänge auf den Maschinen geschlossen ablaufen. Da das wegen der im allgemeinen relevanten Einrichte- und Umstellzeiten (und -kosten) gefordert wird, muß außerdem gelten:

$$(107)\quad a_{ij}k_i\, x_{ijt} - a_{ij}k_i\, x_{ij(t+1)} + \sum_{t=t+2}^{T} x_{ijt} \leq a_{ij}k_i \qquad \begin{matrix} t=1\ldots T \\ i=1\ldots n \\ j=1\ldots m \end{matrix}$$

In Worten ausgedrückt: Die Fertigung des Gutes i auf der Maschine j für den Zeitabschnitt t (also $x_{ijt}=1$), vervielfacht mit den erforderlichen Zeitabschnitten $a_{ij}k_i$, vermindert um den gleichen Wert des Folgeabschnittes t+1 und vermehrt um die für diese Fertigung vorgesehenen weiteren Zeitabschnitte darf höchstens gleich sein der Zahl der erforderlichen Zeiteinheiten. Diese Bedingung ist dann nicht erfüllt, wenn Lücken im Produktionsplan für ein Gut bestehen, wenn also ein oder mehrere x_{ijt} gleich 0 sind, spätere x_{ijt} aber wieder gleich 1 sind, weil dann das Abzugsglied $a_{ij}k_i\, x_{ij(t+1)}$ wegfällt, nicht aber die Summe $\sum_{t=t+2}^{T} x_{ijt}$ kleiner wird, so daß die linke Seite der

Gleichung größer wird als die rechte.

Wie ist die Zielfunktion zu formulieren? Zweifellos genügt es nicht, die Summe aller x_{ijt} über alle Maschinen, Produkte und Zeitabschnitte zu minimieren; denn damit ist nicht gesichert, daß der Produktionsplan möglichst kurz ist, d.h. die Lücken beim Anschluß der Güter auf den Maschinen nacheinander minimal sind, also die Zahl der $\sum_{j=1}^{m} x_{ijt} = 0$ möglichst gering ist. Entsprechend dem Ansatz und der Lösung des nx2- bzw. 2xm-Falles bei Johnson (s. S. 113) kann man als zu minimierende Größe die insgesamt erforderliche Zeitspanne ansehen. Die Zielfunktion würde dann, wenn die Zeitabschnitte t entsprechend dem natürlichen Zeitablauf numeriert sind, lauten:

(108) $$t_{(max)} = \text{Minimum}$$

Bowman[114] umgeht diese rechentechnisch wohl etwas schwierig zu programmierende Formulierung (schwierig deshalb, weil statt der Variablen x_{ijt} direkt ihre Indizierung t minimiert werden soll) mit Hilfe eines Kunstgriffs, indem er der Fertigung in den Zeitabschnitten Werte zumißt und die späteren Zeitabschnitte höher bewertet als die früheren, und zwar so, daß die bewertete Produktion in einem späteren Abschnitt zu einem höheren Wert führt als die Summe über alle davorliegenden bewerteten Produktionen. Bowman[114] setzt daher willkürlich fest, daß der "Kostenwert" K für die Produktion im Zeitabschnitt t das 4-fache des Wertes im Abschnitt t-1 betragen soll. Dieser Effekt wird aber ganz allgemein erreicht bei einer zeitlichen "Kostenkurve" in Form einer geometrischen Reihe mit dem konstanten Quotienten zweier aufeinanderfolgender Glieder von mindestens gleich 2. Wenn man also für das Ziel Z schreibt:

(109) $$Z = \sum_{t=1}^{T} K_t \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{m} x_{ijt} = \text{Minimum!}$$

---

114) E. H. Bowman: "The Schedule-Sequencing Problem", a.a.O., p. 623.

wobei

$$f \geq 2$$

$$K_t = f \cdot K_{t-1} \qquad K_1 \geq 1 \quad (t=1...T) \tag{110}$$

so ergibt sich, daß möglichst frühe Zeitabschnitte t ausgesucht werden und daß der Tausch der letzten, in einem möglichen Produktionsplan zur Fertigung vorgesehenen Einheit in einen früheren Zeitabschnitt selbst so, daß alle anderen Fertigungen um einen Zeitabschnitt verschoben werden müssen und somit Lücken geschlossen werden, günstig ist.

Damit steht im Prinzip ein Programm für die Ablaufplanung fest. Die Schwierigkeit liegt nur darin, daß es sich um ein ganzzahliges lineares Programm handelt[115]. Solange noch nicht die geeigneten, eventuell näherungsweisen Rechenmethoden für größere ganzzahlige Programme entwickelt sind, ist auch dieser Ansatz nur für kleine Zahlen von Gütern und Maschinen rechenbar. (Immerhin ist die Entwicklung der Rechentechniken für ganzzahlige lineare Programme erst am Anfang[116]; es ist daher schon von Wert, ein Problem, wenn es nicht anders geht, als ganzzahliges Programm zu formulieren.) Die Zahl der zu verrechnenden Variablen x_{ijt} bestimmt sich aus $n \cdot m \cdot T$ (Zahl der Güter x Zahl der Maschinen x Zahl der Zeitabschnitte). Wie weit es möglich ist, diese Zahl dadurch erheblich zu drücken, daß man aus der Anschauung heraus einen brauchbaren möglichen Ablaufplan bildet und für die Verschiebungen bei der Errechnung verbesserter Pläne Schranken setzen kann, so daß ein Teil der x_{ijt} ausgeschlossen wird, läßt sich ohne praktische Erfahrung und allgemein nicht sagen. Immerhin könnten hier Möglichkeiten bestehen, nicht exakt aufgestellte Ablaufpläne auf ihre Verbesserungsmöglichkeiten hin zu testen.

---

115) vgl. S. 51 ff., insbesondere auch Anmerkung 61.

116) vgl. W. Dinkelbach und F. Steffens: "Gemischt ganzzahlige

Auf den ersten Blick könnte sich der Versuch anbieten, die Techniken und Lösungen zur Theorie der Warteschlangen für das Maschinenbelegungsproblem einzusetzen[117]. Die Situation einer Warteschlange ist durch folgendes gekennzeichnet: Auf eine Bedienungsstation kommen Einheiten zu. Zur Abfertigung werden je Einheit bestimmte Zeiten gebraucht. Sofern die Einheiten stets so ankommen, daß die Bedienungsstation ständig beschäftigt ist, ist das System ausgeglichen, wenn die Summe der erforderlichen Bearbeitungszeiten nicht größer ist als die Kapazität der Bearbeitungsstation. Wenn nun die Einheiten wahllos und zufällig verteilt ankommen, so kann es sein, daß zu gewissen Zeiten die Station unbeschäftigt ist, zu anderen Zeiten aber gleichzeitig oder in kürzeren Abständen, als die Dauer der Abfertigungszeiten beträgt, mehrere Einheiten ankommen. In diesem zweiten Fall bildet sich eine Warteschlange vor der Station; diese kann sich theoretisch übrigens nicht mehr voll zurückbilden, wenn das System in Belastung und Kapazität im Mittel gerade ausgeglichen wurde, weil gewisse Arbeitszeiten während der Untätigkeit der Station unwiederbringlich verlorengegangen sind. Sofern über die Verteilung der Ankünfte und Abfertigungen und ihre Wahrscheinlichkeiten Aussagen oder Annahmen gemacht werden können, kann ein Warteschlangenmodell entwickelt werden, das Aussagen über die Zahl der erforderlichen Bedienungseinheiten, die zu erwartende mittlere Schlangenlänge und die Wartezeiten von noch nicht abgefertigten

---

116) Forts.: ...lineare Programme zur Lösung gewisser Entscheidungsprobleme", Unternehmensforschung, Bd. 5 (1961), S. 3-14; vgl. auch: W. Krelle: "Überblick über die Problemgruppen der Unternehmensforschung und den Stand der Anwendung", Zeitschr. für handelswiss. Forschung, N F, 13. Jg. (1961), S. 335-353 bes. S. 349

117) Zur Warteschlangentheorie vgl. z.B. Ph. Morse: Queues, Inventories and Maintenance, New York 1958, und H. Schneeweiss: "Zur Theorie der Warteschlangen", Zeitschr. für handelswissenschaftl. Forschung, N F, 12. Jg., (1960), S. 471-507

Einheiten oder von Bedienern und deren Zusammenhänge gestattet. Diese Engpaßsituation ist aber nicht das Problem der Maschinenbelegungsplanung, bei der gerade versucht wird, das stochastische Element bei den Arbeitsterminen zu eleminieren. Für die Maschinenbelegungsplanung kommt es darauf an, die Reihenfolgen der Einheiten so zu regeln, daß möglichst wenig Wartezeiten bei den Bedienern und bei den abzufertigenden Einheiten entstehen. Für das W rteschlangenmodell ist aber die Reihenfolge der ankommenden Einheiten gleichgültig; dieses regelt nur durch die Kapazität der Bedienungsstation (die hier gerade festliegt) unter der Voraussetzung einer bereits bestimmten wahrscheinlichen zeitlichen Verteilung der Ankünfte (die hier gerade erst durch die Reihenfolgefestlegung stationsweise erzeugt werden und dann nicht mehr stochastischer Natur sein soll). Die Modelle der Theorie der Warteschlangen und ihre Lösungen lassen sich also, weil sie das voraussetzen, was hier gesucht ist, nicht auf das P. oblem der Maschinenbelegungsplanung anwenden.

2.323 Hinweise auf Näherungslösungen

Aus den bisherigen Erörterungen geht hervor, daß es exakte Lösungen des Problems der Ablaufplanung, so wie wir sie detailliert aufgefaßt haben, indem ein Stück bzw. ein Los eines Gutes und jeweils eine Maschine eines Arbeitsganges einzeln betrachtet werden, wohl in einer allgemeinen Form gibt, daß aber diese Lösungen an rechentechnische (und -zeitliche) Grenzen stoßen, die im Anwendungsfall realen Zahlenumfanges nicht ohne weiteres überschritten werden können. Ist nun die detaillierte Betrachtung, die, wie sich leicht denken läßt, der Schlüssel zu allen Weiterungen des P. oblems wäre, unbedingt vonnöten, besteht das Problem der Ablaufplanung überhaupt in der Praxis in dieser Schärfe?

Für eine Antwort auf diese Frage muß man zwei Fälle trennen; einmal gibt es den Fall mit einer größeren Anzahl einzelner Lose und nur einer Maschine für jeden Arbeitsgang, zum anderen gibt es den Fall mit sonst gleichen Umständen, aber mehreren Maschinen gleichen Typs in einer Station, die bei gleichen technischen Gegebenheiten beliebig substituierbar sind. Ein dritter möglicher Fall mit wenigen großen Losen braucht nicht näher betrachtet zu werden, weil bei ihm der Produktionsablauf aufgrund der für die Lose gegebenen technischen Bedingungen im wesentlichen feststeht und die Maschinenkapazitäten auch zeitlich darauf abgestimmt sein dürften.

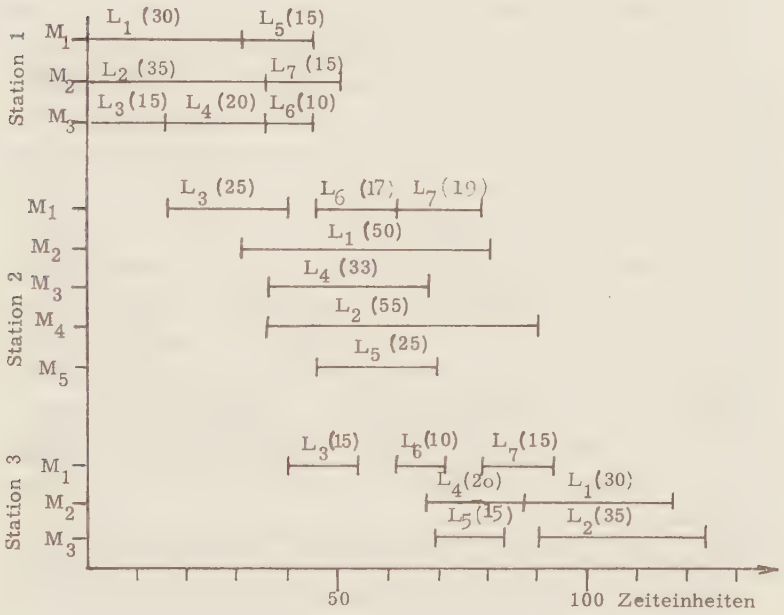
1. Beim Regelfall mit einer für die Auslastung der Stationen genügend großen Anzahl von Losen, welche so groß sind, daß die durchschnittliche Bearbeitungsdauer eines Loses auf einer Maschine wesentlich kleiner als die Planungsperiode ist, und jeweils mehreren gleichartigen Maschinen in einer Station wird es immer möglich sein, mit Hilfe eines Durchflußdiagramms (oder Entsprechendem) einen brauchbaren Ablaufplan zu entwickeln. In diesem Falle wird durch die gleichzeitige Fertigung auf mehreren Maschinen so häufig eine Maschine gerade frei werden, daß jedes Los nur eine beschränkte Zeit warten muß, bis es weiterbearbeitet werden kann. Das setzt den Ausgleich der Kapazitäten in den einzelnen Stationen natürlich voraus. Davon darf aber ausgegangen werden, weil sonst in jedem Fall, gleichgültig wie das Planungsverfahren ist, sich die Lose vor einer Engpaßstation kumulieren. Langfristig ist daher der Ausgleich durch entsprechende Maschinenbestände unerläßlich, kurzfristig wird entweder die Kapazität durch Überstunden ausgeglichen oder es werden für die Planungsperiode nur solche Lose aufgenommen, die die Stationen insgesamt entsprechend ihren Kapazitäten belasten.

Die Planungsmaxime besteht für diesen Fall also einfach daraus, losgrößenunabhängige Schwankungszwischenlager vorzusehen so hoch, daß normalerweise die Maschinen bei Beendigung eines Loses sofort mit einem neuen Los beschäftigt werden können. Die hierfür durchschnittlich erforderliche Lagermenge wird sich im Anwendungsfall empirisch oder durch Modellexperiment feststellen lassen.

Das Warten von Maschinen (Lücken im Ablaufplan) dürfte wegen des Produktionsgewinnausfalls und der Bereitschaftskosten für die Maschinen in den meisten Fällen teurer sein, als das Warten von Halbfabrikaten (sofern sie natürlich auch über nicht nur kurze Zeiten lagerfähig sind; das mag z. B. für chemische und wärmetechnische Fertigungen nicht zutreffen), weil für diese praktisch nur Zinskosten anfallen. Daher ist ein Ablaufplan ohne Lücken bei den Maschinen eo ipso nicht schlecht, zumal da lückenlose Produktion am ehesten zugleich zu kürzesten Gesamtdurchlaufzeiten (also Zwischenlagern) führt. Wie die Reihenfolge der Produktionseingabe geregelt wird, hängt von einigen speziellen Gegebenheiten ab.

Haben die Güter alle ziemlich die gleiche Reihenfolge der Bearbeitungsstationen, so erübrigt sich ein besonderes Eingabeverfahren, die Lose können in der gewünschten zeitlichen Reihenfolge in die erste Station eingegeben werden und werden auch ungefähr in dieser Reihenfolge die letzte Station verlassen unter zwei Voraussetzungen: 1. Die Meister der einzelnen Fertigungsstationen werden gehalten, die Lose in der Reihenfolge zu bearbeiten, wie sie bei ihnen eingegangen sind. (Da auf eine Station zu ungefähr gleichem Zeitpunkt mehrere Lose zukommen können, könnte sonst durch Vorziehen des zuletzt eingegangenen Loses auf die zuerst freie Maschine innerhalb der ursprünglich eingegebenen Losreihenfolge getauscht werden. Hierin liegen auch die Möglichkeiten, die Lose in besondere eilige und

weniger eilige zu differenzieren. Das Durchziehen von eiligen Losen bewirkt dann, wie man erkennt, gleichzeitig eine Verzögerung bei den übrigen Losen.) 2. Die Lose müssen alle ungefähr die gleiche Größe und somit in den einzelnen Stationen etwa gleichlange Bearbeitungszeiten haben. Unterscheiden sich die Losgrößen, so tritt der Effekt ein, daß die kleineren Lose schneller als die größeren durchlaufen. Dies soll an einem einfachen Durchflußdiagramm gezeigt werden.



Es sind 7 Lose zu fertigen auf 3 Stationen, deren Maschinenzahlen und Takte sich wie 3:5:3 verhalten. Die Verhältnisse der Losgrößen gehen aus den erforderlichen Bearbeitungszeiten hervor. Es zeigt sich, daß schon bei diesem Durchlauf durch nur 3 Stationen die kleineren Lose, obgleich sie in Station 1 später als andere begonnen wurden, in der Reihenfolge vorrük-

ken (z.B. L_6, L_4, L_5). Hier wurde geschlossene Losweitergabe unterstellt; das gleiche gilt aber auch bei geteilter Losweitergabe mit minimalem Zwischenlager, weil die Kumulations- bzw. Zerreißlager (vgl. S. 102 ff.) sich proportional zur Losgröße verhalten. Da also mit größerer Losgröße für die Werkstücke die Zeiten des Wartens auf die Bearbeitung der übrigen zugehörigen Teilemenge steigen, müssen sich dementsprechend die möglichen Fertigungsbeginne für die größeren Lose gegenüber den kleineren verschieben. Die oben genannte erste Regel unterstützt diesen Effekt noch. Ginge man aber nicht nach dieser vor, sondern forderte, daß die in der ersten Station festgelegte Reihenfolge in den Folgestationen beibehalten werden soll, so müßte vor jeder Station ein erhöhtes Zwischenlager gehalten werden, um die sonst entstehenden Lücken zwischen den Losen auffüllen zu können.

Haben die Lose nicht jeweils die gleiche Reihenfolge der Stationen, so ist diese einfache, nur aus allgemeinen Anschlußvorschriften bestehende Loseingabe und Durchschleusung, die lediglich gewisse Schwankungszwischenlager erfordert, nicht mehr möglich, weil es dann von der Reihenfolge der Eingabe abhängt, ob die einzelnen Stationen fortlaufend beschäftigt sind (vgl. Figur 16 u. 17, S. 131 f.); auch eine größere Anzahl von Maschinen in jeder Station sichert das nicht, sondern erleichtert das höchstens. Handelt es sich nur um wenige "Produktionsbäume" (Reihenfolgen der Stationen für bestimmte Fertigungen) und um ungefähr gleichbleibende Mengenverhältnisse, so wird es möglich sein, die Lose irgendwie zu klassifizieren und Regeln für die Loseingabe aufzustellen, die im Durchschnitt die gewünschte Art der Losanschlüsse gewährleisten (hierzu vgl. Abschnitt 2.33 S. 156 ff., insbesondere S. 168 ff.). Derartige Regeln lassen sich auch durch Simulation der vorliegenden Grundaufgabe erarbeiten. Man erzeugt in einem Rechenprogramm die Verhältnisse des realen oder eines vereinfachten fiktiven Betriebes, wählt beliebige Ausgangssituationen, rechnet diese durch und schließt von den den besten Ergebnissen zugehörigen Ausgangssituationen auf die entsprechenden Steuerungsregeln.

Ist die Zahl der Experimente genügend groß und testet man die gleichen Ausgangssituationen dann durch mehrere mögliche Steuerungsregeln, so gewinnt man u.U. bessere Erkenntnisse über das Problem als wenn man lediglich von den in der Vergangenheit realisierten Arbeitsfolgen, also von der "Erfahrung", auf Steuerungsregeln schließt, weil hier der Vergleich mehrerer Steuerungsprinzipien und ihrer Auswirkungen fehlt. Auf derartige Simulationen weist R. Sisson[118] besonders hin; für ihre Technik sei auf die dort angegebene Literatur verwiesen. Handelt es sich um viele mögliche Stationsreihenfolgen und sind diese mit sehr unterschiedlichen und häufig sich ändernden Mengen besetzt (allgemeinster Fall der Mehrprodukten-Mehrstufenfertigung), so ist, wenn auch eine Simulation versagt, die einfachste Möglichkeit, diese Planungsaufgabe anzunähern, der graphische (oder sonst entsprechend augenscheinliche) Durchlaufplan. Durch geeignete Verschiebung der Lose wird es immer möglich sein, einen gegebenen, in den Kapazitäten und Belastungen ausgeglichenen Produktionsplan für eine Periode so anzuordnen, daß Lücken im Ablaufplan weitgehend geschlossen sind. Je größer die zulässigen Zwischenlager angesetzt werden, um so leichter wird das möglich, um so länger wird aber auch die Durchlaufzeit der Lose sein.

Natürlich werden diese Ablaufpläne nicht sicher jeweils der optimale Ablaufplan sein, die Zwischenlager und Durchlaufzeiten bleiben also größer, als sie es theoretisch sein müßten. Im Sinne des oben formulierten prinzipiellen Zieles, Anordnung der Produktion so, daß die Gesamtdurchlaufkosten minimiert werden,

---

118) R. Sisson: "Sequencing Theory", in: Progress in Operations Research, Vol. 1, Edited by R. Ackoff, New York - London 1961, pp. 295-326; R. Sisson: "Methods of Sequencing in Job-Shops- A Review", Operations Research, Vol. 7 (1959), pp. 10-29; vgl. auch G. Morgenthaler: "The Theory and Application of Simulation in Operations Research", in: Progress in Operations Research, hier a.a.O., pp. 366-419, besonders pp. 398

stellen derartige Verfahren vielleicht nur eine schlechte Näherung dar, weil sie Maschinenwartezeiten als Alternative zu Produktwartezeiten gar nicht in Betracht ziehen und weil trotz der schon erwähnten Kostendifferenzen zwischen diesen beiden Größen Maschinenwartezeiten günstig sein können. Das Ziel besteht aber oft nicht allein in kostengünstigster Produktion, sondern zusätzlich aus organisatorischen Gründen, deren Kosten nicht exakt angegeben werden, darin, daß die Stationen und Maschinen auch kurzfristig gleichmäßig belastet sein sollen. Unter dieser Nebenbedingung dürften derartige Näherungen dagegen zu guten Ergebnissen führen und einen optimalen, errechneten Plan ersetzen, insbesondere da die Möglichkeit bleibt, die Lose in solche, die möglichst schnell durchlaufen sollen, und solche, bei denen eine Zeitverzögerung in Kauf genommen werden kann, zu differenzieren. Nachteilig bleibt dabei, daß für eine solche Ablaufplanung keine eindeutigen Rechenregeln angewandt werden können, sie also auch nicht einem Rechengerät voll übertragen werden kann. Dieser Nachteil dürfte aber aufgewogen werden dadurch, daß ein von Hand graphisch aufgestellter Ablaufplan übersichtlicher als eine Termin-Zahlenreihe ist und vor allem relativ leicht kurzfristig umgeändert werden kann.

2. Beim anderen Fall mit nur jeweils einer Maschine eines Types in einer Station ergibt sich nicht so ohne weiteres ein Ausgleich der Losanfänge mit den Losenden, insbesondere dann nicht, wenn die Maschinenreihenfolgen für die einzelnen Güter sehr unterschiedlich sind, wie es sich in den betrachteten Beispielen oben auch schon zeigte. Die Ablaufplanung für eine Stationenfolge mit jeweils nur einer Maschine je Station oder Arbeitsgang dürfte aber in der Praxis nicht allzu häufig vorkommen, oder da, wo sie auftritt, im Umfang des Problems (Zahl der Stationen, Zahl der Lose je Planungsperiode, Unterschiede in der Maschinenreihenfolge für die einzelnen Lose) klein sein, so daß

entweder eine Lösung nach einem der oben genannten exakten Verfahren oder auch nur nach dem Augenschein möglich und sinnvoll ist.

Für die tatsächlich zu berechnende Planungsaufgabe kann das gegebene Problem unter Umständen reduziert werden; nämlich dann, wenn nicht alle Stationen voll ausgelastet sind und nur einige Stationen Engpaßabteilungen darstellen. Die Planungsaufgabe braucht nur letztere zu umfassen, da die Reihenfolge in den nicht ausgelasteten Stationen leicht darauf abgestimmt werden kann, weil dort auf alle Fälle Lücken im Ablauf entstehen. Gibt es nur zwei Engpaßstationen, so ist eine exakte Lösung nach der Johnson-Regel möglich. Gibt es mehrere Engpaßabteilungen, so kann entweder das entsprechende ganzzahlige lineare Programm formuliert und gelöst werden, oder wenn der Zahlenumfang das nicht gestattet, es muß auch hier auf eine Näherung mittels eines graphischen Durchlaufplanes zurückgegriffen werden, die um so besser werden dürfte, je weniger Stationen einzubeziehen sind.

Wir begnügen uns mit diesen Hinweisen, die etwas mager ausfallen, soweit auf einfache, schon immer übliche und ohne eigentliches Kalkül und nur aus der Übersicht über die Größen der Aufgabe zu entwickelnde Durchflußdiagramme zurückgegriffen wird. Sie zeigen, daß - sofern die angedeuteten exakten Planungsansätze für das Maschinenbelegungsproblem versagen oder zu aufwendig und umständlich sind - auch für die Näherungen keine generellen Regeln angegeben werden können. Aus dem Bisherigen geht aber auch hervor, daß und wie es für den speziellen Fall auf der Grundlage der speziellen Gegebenheiten (die das Problem sowohl vereinfachen, als auch komplizieren können) möglich sein kann, ein hinreichendes rechnerisches

Näherungsverfahren für die Ablaufplanung zu entwickeln[119]. Ein Beispiel für eine derartige Erarbeitung von Ablaufplanungsregeln für spezielle Voraussetzungen soll im folgenden Abschnitt gegeben werden.

2.33 Erweiterung: Durchfluß, Maschinenbelegung und Zwischenlager bei losreihenfolgeabhängigen Maschinenumstellkosten[120]

2.331 Problemstellung

In den beiden vorangegangenen Abschnitten wurden die grundsätzlichen Zusammenhänge zwischen Losgröße, Durchlaufzeit und Zwischenlager und das Problem der Durchflußplanung diskutiert. Es wurde ausgegangen von einer einfachen Mehrprodukten-Mehrstufenfertigung, einer Fertigung mehrerer Güter, die mehrere Fertigungsmaschinen nacheinander erfordert, deren Bearbeitungsgeschwindigkeiten unterschiedlich sind. Hier soll nun das Problem erweitert werden, nämlich es soll auf die Besonderheiten bei der zusätzlichen Bedingung, daß die Umstellzeiten von der Reihenfolge der Lose abhängen, zugleich eingegangen werden. Um den Sachverhalt zu konkretisieren und zu zeigen, wie die oben allgemeiner beschriebenen Näherungslösungen angesetzt werden können, soll für die Lösung dieses Falles auch ein mögliches rechnerisches Näherungsverfahren angegeben werden.

---

119) M. E. Salveson: "A Problem in Optimal Machine Loading", Management Science, Vol. 2 (1956), pp. 232-260, gibt hierfür etwa ein Beispiel. Dort geht es darum, aus dem Produktionsprogramm bestimmte Güter so in Art, Anzahl und Menge für eine Planungsperiode zusammenzustellen, daß die aufeinanderfolgenden Kapazitäten voll ausgelastet sind, wobei die einzelnen Kapazitäten von mehreren Gütern beansprucht werden bzw. werden können.

Von den folgenden Gegebenheiten sei ausgegangen:

1. Es werden mehrere Güter (oder Abmessungen und Typen eines Gutes) gleichzeitig in abgeteilten Losen gefertigt.

2. Die Fertigung geschieht in mehreren aufeinanderfolgenden Stationen mit jeweils mehreren gleichartigen Maschinen; die Reihenfolge der Stationen ist für die Güter unterschiedlich.

3. Die aufeinanderfolgenden Maschinen in den Fertigungsstationen haben unterschiedliche Bearbeitungsgeschwindigkeiten. Die Fertigungskapazitäten sind durch unterschiedliche Maschinenbestände in den einzelnen Stationen aufeinander abgestimmt.

4. Die Maschinen müssen nach Beendigung eines Loses umgestellt werden für das anzuschließende Los (Einbau anderer Werkzeuge und Vorrichtungen, Neujustierungen, Veränderungen an den Maschineneinstellungen wie Geschwindigkeit, Hub, Kühlung, u.ä.). Diese Rüstzeiten seien relativ zu den Bearbeitungszeiten so groß, daß man bestrebt sein muß, die Lose in den Fertigungsabteilungen nicht zu spalten und auf mehrere Maschinen zu verteilen, sondern geschlossen über eine Maschine laufen zu lassen, damit diese "unproduktiven" Umstellzeiten nur einmal je Los und Station auftreten.

5. Die Zahl der Güter bzw. Typen sei so mannigfach und die Güter sollen in solchen Stückzahlen hergestellt werden, daß es nicht möglich ist, in den Fertigungsabteilungen die einzelnen Maschinen ständig für bestimmte Güter oder Typen laufen zu lassen, um auf diese Weise Umstellungen zu vermeiden.

Bis dahin besteht im Prinzip kein Unterschied gegenüber den vorangegangenen Überlegungen; und es wird sich zeigen, daß die

---

120) Ein erster Überblick wurde bereits gegeben in: U. Pfaffenberger: "Produktionsplanung bei losreihenfolgeabhängigen Maschinenumstellkosten", Unternehmensforschung, Bd. 4 (1960), S. 29-40

Erkenntnisse oben gültig bleiben und Verwendung finden werden. Hier soll aber noch eine grundsätzlich andere und neue Produktionsbedingung bestehen, die bei mechanischer Präzisionsfertigung und bei Produktionen, die die Maschinen verunreinigen (z.B. mit Farbstoffen bei allen Arten der Druckerei), vielfach gegeben sein kann:

6. Die bei der Umstellung der Maschinen auf neue Lose entstehenden Umstellzeiten sind von der Reihenfolge der Lose abhängig, also unterschiedlich je nach dem, von welchem Gut auf welches Gut umgestellt wird.

In einer solchen Mehrprodukten-Mehrstufenfertigung sind mehrere Größen regelbar.

Der Durchfluß könnte einmal so gestaltet werden, daß die Reihenfolge der Lose in der ersten Station für alle Stationen vorgeschrieben und die Losreihenfolge so festgelegt wird, daß die Gesamtumstellzeiten aller Stationen zusammengenommen, also die Umstellkosten insgesamt, minimiert werden. Bei einer solchen Ablaufregelung müßten notwendig Maschinenwartezeiten zugelassen werden (vgl. S. 131 ff.).

Nun können aber Zwischenlager den einzelnen Fertigungsstationen eine Auswahl zwischen mehreren Losen ermöglichen, so daß die in der Vor-Station realisierte Los-Reihenfolge nicht unbedingt in der Folge-Station eingehalten werden muß und vielleicht bessere Losanschlüsse gemacht werden können; außerdem wirken derartige Auswahl-Zwischenlager als Puffer, so daß Maschinenwartezeiten vermieden werden können. Zum zweiten sind daher die optimalen Größen von Auswahl- und Pufferzwischenlagern (die also über das durch die Losgröße gewissermaßen technisch vorgegebene Maß der losgrößenabhängigen Zwischenlager hinausgehen, vgl. Abschnitt

2.31) zwischen den Fertigungsabteilungen zu bestimmen, wobei Lagerhaltungskosten und Umstellkostenersparnis aufgrund des Auswahleffektes und Ersparnis von Maschinenwartekosten gegeneinander abzuwägen sind.

Zum Dritten muß (von technischen Erwägungen abgesehen) die durchschnittliche oder maximale und minimale Losgröße festgesetzt werden. Bei höheren Losgrößen vermindern sich die Zahl der Lose und der Umstellungen und damit die Umstellkosten, dagegen erhöhen sich die losgrößenabhängigen Zwischenlager und ihre Kosten.

Ein viertes Problem für eine derartige Ablaufplanung wird sein, Produktionssteuerung und Lagerauswahlprinzipien so festzulegen, daß eine geordnete Terminplanung und -sicherung möglich ist und eine begrenzte Auswahl besonders eiliger Lose kurzfristig bevorzugt durchgezogen werden kann, ohne daß das Planungssystem zusammenbricht. Gerade diese Frage wird aber stark vom Einzelfall abhängen; auf sie soll daher im folgenden nur nebenbei eingegangen werden.

Formal läßt sich das vorliegenden Problem etwa wie folgt beschreiben: Es seien

L_g = ein Los des Gutes g mit der Stückzahl L $\quad (g = 1 \ldots G)$

m_s = Maschine m $(m_s = 1 \ldots M_s)$ der Station s $\quad (s = 1 \ldots S)$

T_s = Takt (Ausstoß je Zeiteinheit) der Maschinen in der Station s (Wird also für alle Maschinen einer Station als gleich unterstellt).

Es bestehen folgende Zusammenhänge:

a)

(112) $\quad M_s = f(T_s)$ $\quad$ vgl. Punkt 3 (S. 157)

b) Jede Umstellung u einer Maschine m_s vom Los L_g auf das Los L_{g+1} verursacht eine Umstellzeit u, die für jede Station s abhängig ist vom Gut g und vom Gut g + 1, also:

(113) $u = f(g, g+1, m_s)$ vgl. Punkte 4 bis 6 (S. 157 f.)

Die Umstellzeiten können als proportional den Umstellkosten angenommen werden. Wie diese Umstellzeiten geartet sind, hängt vom Spezialfall ab. Es ist leicht möglich, daß die Umstellzeiten eine gewisse Regelmäßigkeit in ihrem Verhältnis zueinander aufweisen; z.B. in der Art, daß sie reversibel sind, d.h. die Umstellung von g auf g + 1 die gleiche Zeit wie die Umstellung von g + 1 auf g dauert, formal also

(114) $u(g, g+1, m_s) = u(g+1, g, m_s)$.

Noch einfacher wäre es, wenn die Umstellzeiten einer linearen Metrik folgen würden, so daß für alle Umstellzeiten zusätzlich gelten würde:

(115) $U(g, g+1, m_s) = u(g, g+2, m_s) - u(g+1, g+2, m_s)$

Dieser Fall dürfte in praxi selten sein; immerhin läßt er sich vielleicht näherungsweise feststellen. Weiter unten wird sich zeigen, daß diese Eigenschaft sehr von Vorteil für die Lösung sein kann.

Es sei hier von der Möglichkeit abgesehen, daß die Umstellzeiten für ein neues Los nicht nur von dem letzten bearbeiteten Los, sondern auch vom vorletzten Los oder gar der weiteren "Vorgeschichte" der Maschine abhängen. Das käme z.B. dadurch zustande, daß beim vorletzten Los eine Vorrichtung an der Maschine war, die beim letzten Los nicht gebraucht wurde aber auch nicht störte und daher nicht demontiert wurde, die

aber für das neue Los wieder nötig ist. Ebenso sei davon abgesehen, die Losgröße als Bestimmungsgröße für die Umstellzeiten anzusehen. Das kann bei großen Differenzen zwischen den Losgrößen etwa sein, wenn für größere Lose dauerhaftere Werkzeuge mit längerer Justierzeit verwendet werden oder größerer Lagerraum um die Maschinen bereit gemacht werden muß oder wenn nach größeren Losen die Maschinen sorgfältiger durchgesehen werden müssen. Diese erhöhten Kosten seien, wenn überhaupt vorhanden, als in den Fertigungskosten durchschnittlich enthalten unterstellt.

c) Für jedes Los L_g gelten je Übergang mindestens die in Gleichung (78) ff. S. 108 genannten Zwischenlagermengen. Gehen die Zwischenlagermengen vor einer Station über dieses Mindestmaß hinaus, so ermöglichen sie eine Auswahl unter mehreren Losen, die zur Senkung der Umstellzeiten und -kosten und der Stillstandzeiten der Maschinen während der Umstellungen und damit zu erhöhtem Ausstoß in der Periode beitragen können.

Aufgabe ist nun, die Reihenfolge der Lose in der Eingangsstation so festzulegen, und die Auswahllager zwecks Variation dieser Reihenfolge so hoch zu bemessen, daß Umstellkosten und Zwischenlagerkosten zusammen minimiert werden. Diese Aufgabe ist komplexer Art. Es sollen daher die Produktionssteuerung mit dem Ziel der Umstellkostenminimierung und die Frage der Auswahlzwischenlager zunächst getrennt betrachtet werden. In einer aufzustellenden Gesamt-Kostenfunktion wird sich eine Zusammenfassung der Einzelüberlegungen von selbst ergeben.

2.332 Exaktes Produktionssteuerungsverfahren

In den Erörterungen über Durchfluß und Maschinenbelegung wurde dargestellt, daß sich das Mehrprodukten-Mehrstufen-Ablaufplanungs-

problem durch einen ganzzahligen linearen Planungsansatz erfassen (und unter Umständen auch exakt lösen) läßt[121]. Während dort die Güter eine konstante Bearbeitungs- und Umstellzeit aufwiesen und beliebig angeordnet werden durften zu dem Zweck, die Durchlaufzeiten insgesamt zu minimieren, besteht hier wegen der Umstellkostenreihenfolgeabhängigkeit diese Freiheit der Anordnung nicht; es werden hier also die Durchlaufzeiten insgesamt auch noch von der Reihenfolge der Güter beeinflußt. Dieses Problem der Optimierung von Reihenfolgen entspricht einer Klasse von ganzzahligen Programmierungen, die bis heute theoretisch nicht gelöst ist, nämlich dem Problemkreis des Traveling-Salesman. Das Traveling-Salesman-Problem hat seinen Namen nach der Aufgabe bekommen, einem Handlungsreisenden für den Besuch einer Reihe von Orten den kürzesten Weg zu bestimmen unter der Bedingung, daß jeder Ort nur einmal berührt wird und dieser Weg zum Ausgangsort zurückführt. Es gilt also dort, die Einzelverbindungen je zwischen den Orten so zu permutieren, bis die kürzeste Gesamtverbindung erreicht ist. Diese optimale Verbindung (Reihenfolge der Orte) analytisch zu bestimmen, d.h. ohne alle möglichen Verbindungen (das sind allgemein bei n Orten, da jeweils die letzte Verbindung aus den übrigen folgt, (n-1)! Möglichkeiten) zu ermitteln und die beste auszuwählen, ist bis heute nicht möglich[122]. Das analoge, aber umfangreichere Problem stellt sich hier auch: Es gilt, die Umstellzeiten je zwischen den Losen so zu permutieren, bis die kürzeste Gesamtumstellzeit erreicht wird. Die verschärfende

---

121). s.S. 142 ff.

122) Vgl. M. M. Flood: "The Traveling-Salesman Problem", Operations Research, Vol.4 (1956), p.61-75. Der negative Beweis, nämlich der, daß keine allgemeine analytische Lösung existieren kann, steht ebenso noch aus. Für Probleme kleineren Zahlenumfangs sind rechnerische Lösungen möglich, die nicht die Durchrechnung aller möglichen Lösungen erfordern und offenbar (d.h. unbewiesen) zum Optimum führen, vgl. H. Müller-Merbach "Die Ermittlung des kürzesten Rundreisewegs mittels linearer Programmierung", Ablauf- und

Bedingung, daß zur Situation beim Ausgangslos zurückgekehrt werden soll, ist hier zwar nicht gegeben, dafür muß aber die Anordnung der Lose für mehrere Maschinen und bei der Eingabe so erfolgen, daß die Gesamtumstellzeit mehrerer Stationen minimiert wird, wobei die Anordnung für die erste Station wegen der Maschinentaktdifferenzen und unterschiedlichen Maschinenzahlen nicht für die späteren Stationen beibehalten werden kann. Es ist hier also nicht nur eine Reihenfolge zu bestimmen, sondern für jede Maschine einer Station sind Losreihenfolgen festzulegen (d.h. a) die Lose auf die Maschinen aufzuteilen und b) die Lose dabei so anzuordnen, daß die Umstellzeiten insgesamt für alle Stationen minimiert werden). Läßt man auch Lager zu, die über das durch die Losgröße festgelegte Mindestmaß hinausgehen, so wären zusätzliche Permutationen der Lose zwischen den Stationen möglich und zu optimieren.

Man erkennt, daß es schon wegen theoretischer Schwierigkeiten zunächst nicht möglich ist, eine solche Produktionsplanung in ein exaktes Modell zu fassen. Auf die praktischen Schwierigkeiten, einen optimalen "Fahrplan" für die Lose aufzustellen und durchzuführen, sei hier gar nicht näher eingegangen. Voraussetzung wäre u.a. ein äußerst rasches und kompliziertes Kontroll- und

---

122) Forts.: ... Planungsforschung (Operations Research), 2. Jg. (1961), S. 70-83 und die dort angeführte Literatur. Ein Beispiel dafür, wie leicht man bei derartig "simpel" erscheinenden Problemen, wie schon dem rein geometrisch gesehenen des Traveling-Salesman, zu Trugschlüssen verleitet werden kann, lieferte der frühere Wiener Ordinarius B. Thüring. Er glaubte in seinem Aufsatz "Die exakte Ermittlung des kürzesten Rundreiseweges", Bürotechnik und Automation, 1. Jg. (1960), Sonderheft S. 3-15, eine allgemeingültige Lösung gefunden zu haben; diese stellt aber, wie H. Bydekarken ("Die exakte Ermittlung des kürzesten Rundreiseweges?" Bürotechnik und Automation, 1. Jg. (1960), S. 37-39) nachwies, nur für ganz spezielle Voraussetzungen bei der Lage der Punkte eine Lösung dar.

Informationswesen im Betrieb, das die unvermeidlichen Störungen und Zeitverschiebungen aufgrund der Streuung der statistischen Daten über die Bearbeitungszeiten und Zwischenlager unmittelbar melden müßte, damit ein neuer Plan errechnet werden kann.

2.333 Näherungsverfahren für die Produktionssteuerung

Für den Anwendungsfall wird sich eine brauchbare Näherung stets finden lassen. Eine Möglichkeit wäre beispielsweise, auf ein eigentliches planvolles Eingabeverfahren zu verzichten und die Lose per Zufall in die Produktion zu geben. Läßt man vor den Stationen keinerlei Auswahlzwischenlager im obigen Sinne zu, so wird sich, weil in jeder Station angeschlossen werden muß, was von der Vorstation gerade kommt, eine bestimmte (relativ große) durchschnittliche Höhe der Umstellzeiten einspielen. Die Zwischenlager werden bei dieser Eingabe-Maxime relativ niedrig sein, ebenso die Durchlaufzeiten der einzelnen Lose. Da aber, besonders wenn die Losgrößen und die Takte der Maschinen in den einzelnen Stationen stark differieren, hierbei außer den hohen Umstellzeiten auch leicht Maschinenwartezeiten auftreten können[123], führt dieses - immerhin sehr einfache und praktikable Eingabeverfahren - für sich allein sicher nicht zum Kostenminimum.

Bei der Skizzierung des Problems (S. 156 ff.) wurde davon ausgegangen, daß jede Station über mehrere, gleichartige Maschinen verfügt, daß das Produktionsprogramm für die Planungsperiode eine größere Anzahl von Losen umfaßt und daß die durchschnittliche Bearbeitungsdauer eines Loses auf einer Maschine wesentlich kleiner als die Planungsperiode ist. Für

---

123) Vgl. S. 131 ff.

diesen Fall besteht unsere Aufgabe im Prinzip aus folgendem: Die auf jede Station zufließende Menge von Losen ist so in Untermengen auf die Maschinen aufzuteilen, daß die Maschinen gleichmäßig beschäftigt sind, etwa in der Weise, daß die Bearbeitungsdauer jeder Untermenge von Losen der Dauer der Planungsperiode entspricht. Die Untermengen und die Bearbeitungsreihenfolge der Lose innerhalb der Untermengen sind dabei so festzulegen, daß die Umstellzeiten minimiert werden.

Formal läßt sich die Reihenfolgeabhängigkeit der Umstellungen dadurch beschreiben, daß man alle möglichen 2er-Kombinationen der Umstellungen und die entsprechenden Umstellzeiten ermittelt. Bei n Typen des Produktionsprogrammes sind das n^2 Möglichkeiten (der Anschluß eines Typs an denselben Typ ist auch eine Möglichkeit). Schon bei 50 Typen (eine für einen mittleren Industriebetrieb realistische Zahl) sind das 2500 Kombinationen von möglichen Güteranschlüssen in einer Station. Hat man z.B. nur fünf Stationen, so gäbe es 12 500 mögliche Umstellzeiten, eine ungeheuer große Zahl, deren Werte sich noch dazu laufend ändern, wenn Veränderungen und Verbesserungen an den Werkzeugen vorgenommen werden.

Hier werden am ehesten Ansatzpunkte zu einer Vereinfachung des Problems zu finden sein. Es läßt sich sehr leicht denken, daß im Realfall die Umstellzeiten in jeder Station nicht tatsächlich von jedem Gut zu jedem Gut übermäßig verschieden sind, sondern daß sich in jeder Station jeweils einige Güter zu Gruppen zusammenfassen lassen, deren Güter untereinander etwa gleiche Umstellzeiten haben. D.h. also: Es werden sich Klassen annähernd äquivalenter Typen bilden lassen, so daß sich erstens für Umstellungen von Losen gleicher Klasse Umstellzeiten ergeben, die nur wenig um einen Mittelwert variieren, und daß zweitens klassenfremde Umstellungen im Durchschnitt höhere Umstellzeiten erfordern. Einer solchen Klassifizierung können

quantitative Merkmale (z.B. Länge, Breite, Durchmesser o.ä.) oder qualitative Merkmale (z.B. die Form) der Werkstücke zugrunde liegen. Die Klassenmerkmale und die Anzahl der Klassen können natürlich von Station zu Station verschieden sein; aber es läßt sich für den praktischen Fall auch denken, daß es eine Kenngröße gibt, die in mehreren oder allen Stationen hauptsächlich die Umstellzeit bestimmt. Für jede Fertigungsstation ergeben sich Umstellzeitmatrizen, z.B. der Form:

Umstellzeitmatrix für Station s (Umstellzeiten in Std.)

Klasse	1	2	3	4	5
1	3	4	5	7	7
2	4	2	3	4	6
3	5	3	2	3	4
4	7	5	4	3	4
5	7	6	4	3	2

Diese müssen nicht unbedingt symmetrisch sein. Die Diagonalen solcher Matrizen zeigen die "fixen", selbst beim Losanschluß gleicher Typen nicht vermeidbaren Umstellzeiten; (sie entstehen, wenn nach Beendigung eines Loses die Werkzeuge nachjustiert oder stark beanspruchte oder nur einzelne Teile ausgewechselt werden müssen, was gewöhnlich weniger Zeit beansprucht als die vollständige Umstellung auf einen anderen, klassenfremden Typ). Entsprechend können die anderen Werte nach Abzug des Fixwertes als "variable" Umstellzeiten bezeichnet werden. Um diese variablen Umstellzeiten geht es hier in erster Linie, weil sie durch richtige Steuerung je nach Zusammensetzung des Produktionsprogramms der Planungsperiode ganz oder größtenteils vermieden werden können. Die fixen Umstellzeiten können dagegen - sofern technisch möglich - nur durch Erhöhung der Losgrößen vermindert werden.

Wie auch immer die Klassen annähernd äquivalenter Typen gebildet werden, eine Klasseneinteilung ermöglicht, wenn die meisten Klassen so groß gewählt worden, daß jeweils mindestens eine Maschine in den Stationen in der Planungsperiode für sie beschäftigt werden kann, ein Näherungsverfahren für die Produktionseingabe und -steuerung. Als Steuerungsprinzip kann dann nämlich gelten: Es sind jeweils Lose gleicher Klassen anzuschließen. Das Problem der Losanschlüsse ist damit nicht nur im Zahlenumfang vereinfacht, indem die Reihenfolgeabhängigkeit jetzt nur noch zwischen den Klassen besteht (sofern die Klassen auf den Maschinen überhaupt gewechselt werden müssen), sondern es gibt nun jeweils Gruppen von Losen, deren Reihenfolge untereinander beliebig sein darf.

Für nur eine Station und eine Klasseneinteilung ist dieses Eingabeprinzip nahezu trivial. Wie kann aber erreicht werden, daß auch bei mehreren Stationen und mehreren Klasseneinteilungen jeweils nur gleiche Klassen angeschlossen werden, damit die Gesamtumstellkosten aller Stationen möglichst gering werden?

Unterstellen wir zunächst, daß es zwei Umstellmerkmale, also nur zwei Klasseneinteilungen im Produktionsablauf gibt; jedes Los gehört somit in der Klasseneinteilung A und in der Klasseneinteilung B jeweils zu einer bestimmten Klasse. Für beide Klasseneinteilungen läßt sich eine Häufigkeitsverteilung des Produktionsprogramms der Planungsperiode auf die Klassen feststellen. Als Eingabemaxime muß hier gelten: Es ist so in die erste Station einzugeben, daß beide Häufigkeitsverteilungen stets annähernd eingehalten sind. Für die Stationen mit der Klasseneinteilung A und zugleich für die Stationen mit der Klasseneinteilung B wird dadurch gewährleistet, daß die Klassen gleichmäßig und regelmäßig "aufgefüllt" werden und so klassenfremde Anschlüsse im allgemeinen vermieden werden

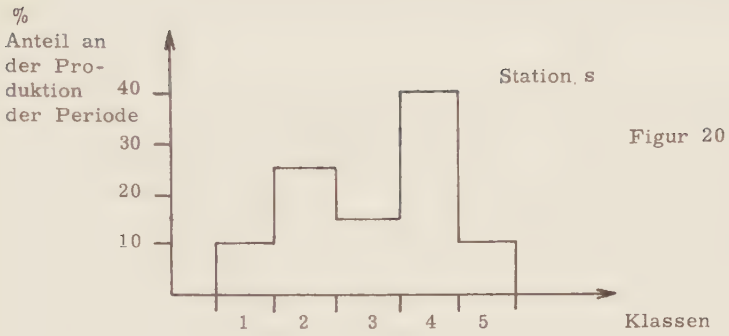
können. Kleinere Streuungen können durch Zwischenlager ausgeglichen werden. Die Häufigkeitsverteilungen werden sich nicht gleich gut einhalten lassen. Man wird die Verteilung besser annähern, deren Stationen besonders umstellintensiv sind.

Das gleiche Verfahrensprinzip gilt auch für den allgemeinen Fall, in dem jede Station ein anderes Umstellungsmerkmal und eine andere Klasseneinteilung hat: Es gilt, die Lose so einzugeben, daß alle Klassenhäufigkeitsverteilungen des Produktionsprogrammes der Periode in jedem Zeitpunkt hinreichend angenähert sind.

Das zu erreichen, erfordert ein Iterationsverfahren für die Auswahl der Reihenfolge der Lose, etwa wie es im folgenden beschrieben wird:
Vorausgesetzt sei zunächst, daß alle Güter bzw. Lose die gleiche Stationenreihenfolge haben; diese Voraussetzung wollen wir später fallen lassen. Außerdem sei angenommen, daß die Kapazitäten der einzelnen Stationen aufeinander durch entsprechende Maschinenbestände abgestimmt sind. Auf der Basis der gegebenen Daten für die Produktionsmengen der Planungsperiode und technischen Koeffizienten für die Maschinen läßt sich folgender Rechengang durchführen:

1. Für jedes Los aus dem Programm der Planungsperiode ist die Zugehörigkeit zu den Klasseneinteilungen der einzelnen Stationen festzustellen.

2. Für das gegebene Produktionsprogramm ergeben sich daraus für jede Klasseneinteilung die Häufigkeitsverteilungen der Lose auf die Klassen (gemessen als relativer Anteil an der zeitlichen oder mengenmäßigen Gesamtproduktion der Periode) z.B. der Form:



Figur 20

3. Jedem Stück eines Loses wird für jede Station ein Wert zugeordnet; und zwar den Stücken der am stärksten besetzten Klasse der Wert 1, den übrigen ein solcher Faktor, daß die Summe der zu einer Klasse gehörigen Werte gleich der Wertsumme der am stärksten besetzten Klasse ist. Kurz: Die Häufigkeitsverteilungen werden durch Bildung von Äquivalenzziffern zu Gleichverteilungen normiert. Für die Station des Beispiels in Figur 20 wäre also der Äquivalenz-Wertfaktor für die Stücke der Klasse 4 $w_4 = 1$, für die Klasse 1 $w_1 = \frac{40}{10} = 4$, Klasse 2 $w_2 = \frac{40}{25} = 1,6$, Klasse 3 $w_3 = \frac{40}{15} = 2,7$, Klasse 5 $w_5 = \frac{40}{10} = 4$.

Diese drei Vorbereitungen sind nur einmal, bevor eine neue Planungsperiode begonnen werden soll, zu treffen.

4. Wird ein Los in die erste Station eingegeben, so kann damit in jeder Station einer Klasse ein Wert zugerechnet werden.

Es sei davon ausgegangen, daß die Produktion bereits im Gange ist, alle Maschinen beschäftigt sind und die Lose so eingegeben wurden, daß alle Klassen der Stationen etwa entsprechend den Häufigkeiten belegt wurden. Das bedeutet, daß in jeder Station für die Klassen Wertsummen vorhanden sind, die - wenn die Rechnung nach 3 angestellt wird - stationen-

weise etwa gleich sein müssen; vollständig wird das allerdings kaum erreicht sein.

Wird nun ein Los in die erste Station eingegeben, so kann in allen Stationen diese ungefähre Gleichheit noch mehr gestört werden. Das ist aber nach den Überlegungen oben beim Zwei-Stationen-Fall unerwünscht. Als nächstes Los ist daher ein solches zu wählen, das in möglichst allen Stationen (Klasseneinteilungen) die Differenzen zwischen den kumulierten Klassen-Wertsummen verkleinert, praktisch also die Klassen auffüllt, die bisher die geringste Summe erreicht haben. Stark besetzte Klassen werden so wegen Prinzip 3 häufiger berücksichtigt als kleinere Klassen, deren Wertsumme stärker steigt, wenn sie einmal aufgefüllt werden. Entsprechend können in den Klassen die Anzahlen der für sie arbeitenden Maschinen festgelegt werden; werden die Klassen gleichmäßig aufgefüllt, so werden diese Maschinen im allgemeinen klasseneigen, also umstellgünstig, umgestellt werden können.

5. Welches Los von den zur Auswahl stehenden Losen aus dem Produktionsprogramm "als nächstes" in Frage kommt, kann also errechnet werden. Festzuhalten sind die erreichten kumulierten Klassen-Wertsummen. Rechnet man mit Tischrechenmaschinen, so dürfte es meist nicht möglich sein, alle Lose, die noch zur Verfügung stehen, durchzuprobieren und das, welches insgesamt die kleinste Wertsummen-Differenz erzeugt, auszuwählen; denn das dürfte zu lange dauern. Man wird dann aber in der Lage sein, nur einige überhaupt in Frage kommende Lose auszuwählen durch den Vergleich ihrer Klassenzugehörigkeiten mit den mangelhaft aufgefüllten Klassen, und nur für diese braucht man dann zu rechnen. Benutzt man einen speicherfähigen Elektronenrechner, entfällt dieser Engpaß, sofern es die Zahl der Lose und ihrer Merkmale gestattet, diese vollständig zu speichern, weil dann ohne großen Zeitverzug

alle Lose durchgerechnet werden können und die Maschine selbst die Entscheidung über das beste "nächste" Los (im obigen Sinne) fällen kann.

Das Verfahren ist eine reine Iteration, d.h. es muß für jede Eingabe eines neuen Loses durchgespielt werden. Die Operationen sind allerdings einfach. Es wird umso unübersichtlicher, je mehr Klasseneinteilungen und Klassen vorhanden sind und je weniger die Zugehörigkeiten zu den Klassen in der Klasseneinteilungsfolge korreliert sind. (Das wäre der Fall, wenn z.B. die Lose, die in der Klasseneinteilung A zur Klasse 5 gehören, häufig in der Einteilung B zur Klasse 3 und in der Einteilung C zur Klasse 4 usw. gehörten. In gewissem Umfang kann eine solche Korrelation aber vielfach gegeben sein. Auch wenn so viele Lose, für die das nicht zutrifft, vorhanden sind, daß die unterschiedlichen Klasseneinteilungen effektiv unterschiedlich sind, bringt der Rest, der diese Gleichläufigkeit aufweist, eine Vereinfachung, insbesondere bei halbmanueller Auswahl der Lose).

Wenn nicht alle Lose die gleiche Stationenreihenfolge haben, sind einige Ergänzungen erforderlich. Beim einfachen Fall mit gleicher Stationenreihenfolge aller Lose besteht theoretisch immer dann die Notwendigkeit, das nächste Los zu ermitteln, wenn eine Maschine der ersten Station frei wird. Sind die nötigen losgrößenabhängigen Zwischenlager zwischen den Stationen[124)] und gewisse Schwankungssicherheitslager vorhanden, ist damit auch gleichzeitig gewährleistet, daß - bei ausgeglichenen Kapazitäten - die Maschinen der Folgestationen regelmäßig weiterbeschäftigt werden können. Diese selbsttätige Regelung gestattete es oben, bei der Auswahl des "nächsten"

124) Vgl. S. 102 ff.

Loses die Fertigungszeiten für die Lose und die Termine der späteren Maschinen, zu denen diese frei werden, außer acht zu lassen. Haben nun nicht mehr alle Lose die gleiche Stationenreihenfolge, so ist der automatische Ausgleich nicht mehr gesichert; er muß daher zusätzlich in den Rechengang eingebaut werden.

Die Prinzipien 1 bis 3 oben behalten auch für den Fall ungleicher Stationenreihenfolgen Gültigkeit. Da nun die Lose nicht mehr in jedem Falle nacheinander auf die Klassen der Stationen zukommen, sondern zu gewissen Zeiten dort sich kumulieren oder fehlen können, da das aber unerwünscht ist, weil dann klassenfremde Maschinenumstellungen erforderlich werden, reicht es nicht mehr, die Klassen-Wertsummen einfach zu betrachten und fortlaufend zu kumulieren; denn die Klassen-Wertsummen sagen nichts über die Zeiträume, in denen die eingegebenen Lose auf die Stationen zukommen, aus. Vielmehr müssen nun auch die Zeiten, in denen ein in die Fertigung gegebenes Los die einzelnen Maschinen belastet, berücksichtigt werden. Wollte man das genau und für jede einzelne Maschine tun, so wäre ein vollkommenes detailliertes Planungsverfahren, d.h. also auch die vorherige genaue Kenntnis der Umstellzeiten, die Voraussetzung. Diese Voraussetzung ist aber gemäß unseren Erörterungen über ein mögliches exaktes Planungsverfahren im Abschnitt 2.332 auf Seite 161 ff. nicht gegeben; es muß also auch hier auf eine Näherung zurückgegriffen werden. Der Bildung von Klassen umstell-äquivalenter Güter (mit ihren Ungenauigkeiten) dürfte die Bildung von Terminklassen adäquat sein. Statt der einfachen Kumulation der Loswerte ist nun die Kumulation und der Ausgleich der Los-Werte terminklassenweise erforderlich. Dazu ist zwar auch die Kenntnis der Fertigungszeiten für jedes einzugebende Los vonnöten. Hierfür reichen aber - wegen der Ungenauigkeit der Klassenbildung - durchschnittliche Werte aus.

Das Eingabeverfahren läuft dann etwa so ab: Die Planungsperiode wird in Abschnitte zerlegt (z.B. je 2 Tage). Wird ein Los in eine Station eingegeben, so muß entsprechend seiner (aus der Losgröße errechenbaren) Fertigungszeit einschließlich gewisser Sicherheitszeiten die terminliche Belastung der Stationen ermittelt werden. Den betroffenen Terminklassen dieser Stationen wird der entsprechende Los-Wert zugerechnet. Die Fehler gegenüber einer richtigen Terminklassenzurechnung, die bei der Verwendung durchschnittlicher Durchlaufzeitwerte entstehen, müssen sich ausgleichen, wenn es sich um echte Durchschnittswerte handelt. Die für eine Terminklasse erreichte Summe darf höchstens gleich dem Quotienten aus der Gesamt-Los-Wertsumme und der Zahl der Terminklassen für die Planungsperiode sein. Es müssen - wie vorher - solche Lose als "nächstes" gesucht werden, die die nächsten Terminklassen auffüllen und für einen Ausgleich der Los-Wertsummen beitragen. Auch hier muß also für jedes Los diese Rechnung nacheinander durchgeführt werden.

Man könnte meinen, daß dieses für den speziellen Fall der Abhängigkeit der Umstellzeiten von der Losreihenfolge entwickelte Planungsverfahren auch - wenn man die Sonderheiten bezüglich der Losreihenfolge streicht - eine Näherungslösung für das im Abschnitt 2.32 Seite 130ff. erörterte allgemeine Problem von Durchfluß und Maschinenbelegung sei. Das trifft jedoch nur zum Teil zu: 1. Die Iteration ermöglicht es, die Lose so auszusuchen, daß die Maschinen im allgemeinen voll besetzt sind und Lücken im Produktionsablauf vermieden werden. Das Ziel der Durchlaufzeitminimierung (oder genauer: der Kostenminimierung unter Abwägung von Produkt- und Maschinenwartezeiten) wird nur insoweit zugleich wenigstens angestrebt, als durch den Ausgleich der Belastungen der einzelnen Stationen im Regelfall die Lose nicht lange vor einer Station warten müssen. Haben alle Lose die

gleiche Stationenreihenfolge, so erübrigt sich- wenn das Reihenfolgeproblem nicht besteht - ein Iterationsverfahren vollends, denn jede Zufallseingabe in die erste Station liefert dann das gleiche Ergebnis. 2. Jede Klassifizierung der Lose nach Losmerkmalen und nach Bearbeitungsterminen wirft Probleme der Ganzzahligkeit bzw. Unteilbarkeit bei den Maschinen und auch bei den Losen und ihrer Fertigungszeiten auf. Diese zwingen zu (die Auf- und Abrundungen beim realen Plan gegenüber dem theoretischen Ergebnis) ausgleichenden Momenten innerhalb des Planungssystems. Ein solcher Ausgleich sind beim Fertigungsablauf Zwischenlager. Es ist also unumgänglich, zwischen den Stationen Lager zu halten, die über das Maß der losgrößenabhängigen Zwischenlager (vgl. S. 102 ff.) hinausgehen. Wie hoch diese Puffer sein müssen, richtet sich nach den Umständen des Einzelfalles. In jedem Falle verlängern sie die Durchlaufzeiten und vergrößern die Abweichung vom theoretischen Optimum.

Das skizzierte Produktionsplanungsverfahren funktioniert auch noch, wenn einige eilige Lose ohne Rücksicht auf ihre Klassenzugehörigkeiten zu frühesten Terminen durchgezogen werden sollen[125]. Werden diese Lose in den Plan autonom eingesetzt, so wird die Iterationsrechnung solche frei verfügbaren Lose zum Anschluß daran auswählen, die am ehesten die durch die eiligen Lose möglicherweise erzeugten Klassen- und Terminklassenwertsummendifferenzen wieder ausgleichen. Selbstverständlich werden die freien Lose dadurch leicht verzögert (vgl. S. 150 f.). Soll erst während des Ablaufs eines festgelegten Planes ein eiliges Los vorgezogen werden, so müßte ein neuer Plan für den Rest des noch nicht ausgeführten alten Planes errechnet werden.

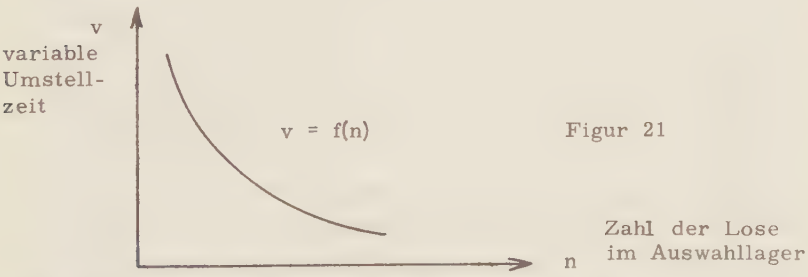
---

125) Zum Problem der Terminplanung als Kriterium der Ablaufplanung vgl. insbesondere Seite 179 ff.

2.334 Auswahlzwischenlager als Planungsgröße des Problems

In den beiden vorigen Abschnitten haben wir nach einem für die Problemstellung optimalen und praktikablen Eingabe- (und Steuerungs-)verfahren gesucht. Wir haben dabei, wie eingangs erwähnt wurde, den Einfluß von Auswahlzwischenlagern als Element der Produktionsplanung zunächst ausgeklammert. Welche Wirkung können derartige Auswahlzwischenlager, also Zwischenlager, die über die bereits erörterten Schwankungs-Sicherheitslager und die Losgrößenlager hinausgehen, auf die Güte der Losanschlüsse und damit auf die Höhe der Umstellzeiten insgesamt haben? Die isolierte Behandlung dieser Frage setzt natürlich ein bestimmtes Verfahren der Produktionseingabe und der Terminplanung als gegeben voraus.

Grundsätzlich dürfte in jeder Station ein Zusammenhang hyperbolischer Art zwischen der Zahl der Lose im Auswahllager n und der durchschnittlichen variablen Umstellzeit je Umstellung v bestehen, etwa wie in Figur 21.



Figur 21

Geht man, wie bei den Überlegungen zu näherungsweisen Eingabeverfahren auf S. 164 zunächst erwogen, einmal davon aus, daß die Lose per Zufall eingegeben werden, so leuchtet ohne weiteres ein, daß bei niedrigem (oder im Extrem: gar keinem) Auswahllager die durchschnittliche Abweichung des Maßes, das für die variablen Umstellzeiten (und beim oben entwickelten Näherungsverfahren für die Klassifizierung nach Umstellklassen)

bestimmend ist, hoch sein wird; also werden auch die variablen Umstellzeiten hoch sein, weil bei Beendigung eines Loses das Los angeschlossen werden muß, das zufällig als nächstes angeliefert wird. Von einer gewissen Höhe der Auswahllager ab werden dagegen die Anschlüsse schon so gut gemacht werden können, daß eine weitere Erhöhung nur noch eine geringe oder gar keine Umstellzeitverkürzung mehr mit sich bringt.

Die Funktion v = f(n) wird sich für den Einzelfall durch Beobachtung, Experiment oder Modell-Experiment statistisch ermitteln und sichern lassen.

Dem entsprechend kann das einfache Zufalls-Eingabeverfahren kombiniert werden mit Auswahlzwischenlagern, die stationsweise so hoch zu bemessen sind, daß variable Umstellkosten und Auswahllagerkosten zusammen minimiert werden.

Auch beim Produktionseingabe- und -steuerungsverfahren der im vorigen Abschnitt skizzierten Art erübrigt sich die Frage nach dem Einfluß von Auswahllagern auf die Güte der Losanschlüsse nicht, weil die Anzahl der Lose immer begrenzt sein wird, so daß die Häufigkeitsverteilungen im Produktionsprogramm während des Losdurchlaufes nur mit Streuungen eingehalten werden können, also durch Auswahllager korrigiert werden sollten. Die oben genannten Schwankungs-Sicherheitslager bieten natürlich je nach ihrer Größe auch schon eine Auswahlmöglichkeit. Die Funktion v = f(n) kann hier einen ähnlichen Verlauf wie in Figur 21 haben, wegen der Klassenbildung und des geregelten Zuflusses kann sie aber auch Unstetigkeiten aufweisen. Die Funktion hängt ab von der Zahl der Lose in der Planungsperiode, der Feinheit der Klassenbildung und der relativen Besetzung der Klassen in den Häufigkeitsverteilungen des Produktionsprogrammes.

Liegt das Eingabe- und Steuerungsverfahren fest, so müssen Losgrößen, Art der Losweitergabe (geschlossen oder geteilt) und Auswahllager in ihren Kosten abgewogen werden. Es sei hier darauf verzichtet, die stets nur für den speziellen Fall gültigen Zusammenhänge abzuleiten.[126)]

2.335 Zusammenfassung

Unsere Überlegungen haben gezeigt, daß die Aufgabe der Durchlaufplanung komplexer Art ist. Für die einfache Planung der Maschinenbelegung, wie sie im Abschnitt 2.32, S. 130 ff. erörtert wurde, wird gefordert, für eine gegebene Menge von Losen, welche durch mehrere Stationen in unterschiedlichen Reihenfolgen geschleust werden müssen, eine solche Reihenfolge zu finden, daß die Kosten von Maschinenwartezeiten (durch Lücken im Ablaufplan) und Produktwartezeiten (Zwischenlager) zusammen minimiert sind. Es zeigte sich, daß es schon für die (Näherungs)-Zielformulierung "Minimierung der Gesamtdurchlaufzeit" nur in speziellen Fällen möglich ist, diese einfache Reihenfolgeplanung exakt zu lösen, insbesondere wenn man davon ausgeht, daß ganzzahlige lineare Programme realen Zahlenumfanges nicht praktikabel sind. Es konnten aber einige Hinweise auf Näherungsverfahren für die Produktionssteuerung gegeben werden. Derartige Näherungen hängen stets von speziellen Gegebenheiten des zu untersuchenden Falles ab. Um zu zeigen, wie und wo man derartige Überlegungen ansetzen kann, wurde im Abschnitt 2.33, S. 156 ff., der Fall erörtert, bei dem die Maschinenumstellkosten der Fertigungsstationen abhängig von der Reihenfolge der Lose sind. Es zeigte sich, daß trotz dieser Verschärfung des Durchlaufplanungsproblems eine

126) Ein Beispiel für die zu entwickelnde Kostenfunktion ist gegeben in: U. Pfaffenberger: "Produktionsplanung bei ...", a.a.O., S. 38-40

brauchbare Lösung gefunden werden kann, die entweder das Prinzip des Zufalls bei der In-Arbeit-Gabe der Lose in die erste Station zur Methode macht und Auswahlzwischenlager als entsprechende Gegengröße vorsieht, oder die sich besondere Eigenschaften des Sachverhalts zunutze macht, wie z. B. eine Einteilung in Klassen in Bezug auf irgendeine Eigenschaft äquivalenter Lose.

2.34 Terminplanung als Kriterium der Ablaufplanung

In den drei vorangegangenen Abschnitten wurde davon ausgegangen, es sei das Ziel der Produktionsplanung, den Durchfluß so zu gestalten, daß Produkt-Wartekosten, Maschinen-Wartekosten und Rüst- und Umstellkosten insgesamt minimiert werden. Dieses Ziel kann angenähert werden durch das Ziel, die Produktdurchlaufzeiten zu minimieren. Die dafür verwendbaren Planungsmethoden müssen- wie sich zeigte - die Güter als Komplex betrachten und eine Planung "nach vorn" enthalten, die von einem gegebenen Ausgangspunkt (Beginn der Planungsperiode) ab die zu planenden Größen und Mengen auf die Planungsperiode beliebig so verteilt, daß das erstrebte Ziel erreicht wird. Besteht diese Freiheit in der Anordnung nicht, so ist die Planung gebunden und eingeschränkt und muß auf das eigentliche mögliche Optimum u.U. verzichten. Eine Terminplanung im engeren Sinne, die für die einzelnen Güter von vornherein Schlußtermine vorschreibt und damit die Freiheit in der Produktionsreihenfolge auch innerhalb einer Planungsperiode einengt, ist daher mit einem Planungssystem und -ziel im obigen Sinne nicht vereinbar. Erst nach Abschluß der Planungsrechnung kann in diesem Falle gesagt werden, wann und in welchen Mengen innerhalb der Planungsperiode die einzelnen Güter zur Verfügung stehen werden. Die Terminplanung folgt also von selbst aus der Produktionsplanung und stellt somit kein eigenes Problem dar. Die Kontrolle der sich ergebenden Produktionstermine ist dann gleichzeitig eine Kontrolle der Durchführung des aufgestellten Produktionsplanes.

Hier wird noch einmal der Umstand deutlich, auf den beim linearen Planungsansatz zur Ermittlung der optimalen Produktkombination (S. 64 ff.) schon hingewiesen wurde: Werden mehrere Güter und Lose in einem Betrieb gefertigt, so besteht faktisch eine produktionsmäßige Verbundenheit dieser Güter oder Lose. Ebenso wie die Entscheidung für eine bestimmte kapazitative

Belastung durch ein Gut oder Los präjudiziert auch eine bestimmte terminliche Belastung mit einem Gut oder Los die verbleibenden Möglichkeiten für die übrigen noch zu "verplanenden" Güter und Lose. Da die Kapazitäten terminlich immer beschränkt sind, ist es daher prinzipiell nicht gerechtfertigt, die auf eine Planungsperiode zu verteilenden Güter und Lose einzeln und nacheinander und unabhängig voneinander zu planen, vielmehr muß der Komplex der faktisch verbundenen Güter simultan betrachtet werden. Dies gilt zumindest, wenn man die Produktionsplanung rein von der Produktionsseite her ansieht, wie es hier bisher geschehen ist.

Nun besteht zuweilen zwar die Zielvorstellung der Kostenminimierung, aber gleichzeitig will man doch die Möglichkeit haben, die Termine für die Güter einzeln und autonom festzusetzen. (Daß diese Ziele in der Regel nicht kompatibel sind, und daß das zweite Ziel im Grunde unwichtig sein dürfte und nur dadurch entstanden ist, daß bei ungeregelter Planung nichts Sicheres über die voraussichtlichen Termine ausgesagt werden konnte und somit nur Terminvorschriften übrig blieben, ist oft gar nicht bewußt. Es sei hier aber unterstellt, daß nicht derartige falsche Vorstellungen, sondern wahres Wollen das Ziel der autonomen Terminfestsetzung aufstellen ließen). Dieses veränderte Ziel führt zu einem neuen Optimum, das kleiner als das oben mögliche sein kann (und in der Regel auch sein wird). In diesem Fall, bei dem die Produktionsplanung von der Absatzseite her betrachtet wird, ist statt der Planung "nach vorn" eine rekursive Planung, die vom festen Endtermin aus die Vor-Termine zurückrechnet, möglich und angebracht.

Eine derartige Ablaufplanung wird im Prinzip ähnlich wie bei der Terminplanung zur Teile-Einsatzplanung[127] vor sich gehen. Für jedes Gut und für jede Station wird entsprechend den be-

127) Vgl. S. 90 ff.

kannten Fertigungszeiten der mindestens erforderliche Schlußtermin der Vor-Station errechnet; entsprechend werden die Zeiten der Stationen belegt. Ist eine Station zu dem errechneten Termin schon besetzt, muß die Produktion weiter vorverlegt werden. Wird nur ein Teil des für die Planungsperiode vorgegebenen Produktions-Mengenplanes in dieser Weise festgelegt, so bleiben auf jeder Station Lücken von noch unbesetzten Fertigungszeiten. Diese können durch den Produktionsrest soweit als noch möglich aufgefüllt werden.

Zwei mögliche konkretisierte Ziele können unter den gegebenen Bedingungen angestrebt werden. Es gilt entweder, den Rest so in die Lücken einzuordnen, daß dieser kostenoptimal gefertigt wird, oder man ist bestrebt, nicht nur den Rest, sondern auch die in den Endterminen festgelegte Produktion in den Nicht-Endstationen so zu vertauschen, daß kostenoptimal gefertigt wird. Die erste Aufgabe ist - für den Rest - identisch mit dem oben behandelten Problem der Ablaufplanung; die oben erwähnten Methoden der Maschinenbelegungsplanung bleiben daher gültig, als eingrenzende Nebendingung kommt lediglich hinzu, daß zu gewissen Zeiten die Stationen schon belegt sind. Selbstverständlich entstehen dadurch für den Rest sehr leicht zusätzliche unvermeidliche Zwischenlager. Die zweite Aufgabe unterscheidet sich von dem ursprünglichen Problem durch zweierlei: Einmal sind die Vertauschungen begrenzt dadurch, daß die terminlich festgelegte Produktion nur auf frühere Termine gegenüber den vorgeschriebenen, nicht aber auf beliebige Termine der Planungsperiode verschoben werden kann; zum anderen muß das Rechenverfahren anders (und komplizierter) sein, weil "rückwärts" gerechnet wird und bei einer einzigen Vertauschung in einer Station fortlaufend die Mindesttermine der Vorstationen umgestoßen werden, aber die Rück-Rechnung stets neu bis zum Termin des Fertigungsbeginns durchgeführt werden muß, denn sonst läßt sich die Planung nicht insgesamt auf die Optimierung des Ziel-

kriteriums hin betrachten. Das Problem wird noch schwerwiegender, wenn verflochtener Teileeinsatz im weiter oben behandelten Sinne vorliegt.

Ist der Teil des Produktions-Mengenplanes der Planungsperiode, für den unveränderliche Endtermine vorgeschrieben sind, relativ zum Rest, dessen Endtermine innerhalb der Periode beliebig sein dürfen, klein, so wird es ausreichen, wenn die erste Aufgabe (fester kürzester Plan für die terminisierte Produktion, optimale Auffüllung der Lücken mit Hilfe des Restes auf der Basis einer Planungsrechnung im vorher behandelten Sinne) gelöst wird[128]. Sollen dagegen für einen relativ großen Teil der Produktion die Endtermine von vornherein festgelegt werden (die gesamte Produktion in der Weise festzulegen, dürfte Schwierigkeiten bereiten und setzt zumindest in den End-Stationen bereits einen Zeit- und Mengenausgleich voraus), so müßte eine Rechnung für die zweite genannte Aufgabe durchgeführt werden.

Es seien mit Absicht hierfür keine näheren Überlegungen angestellt. Das zu konzipierende Rechenverfahren dürfte nicht unabhängig von den Gegebenheiten des Einzelfalles sein. Im Prinzip kann es wieder leicht auf ein ganzzahliges lineares Programm wie auf Seite 142 ff. hinauslaufen. Unter besonderen Bedingungen braucht die Verschärfung der Ganzzahligkeit nicht gegeben zu sein, wie Karush and Moody[129] gezeigt haben; man hat es dann aber schon mit Näherungslösungen und nicht mit der exakten Lösung zu tun. Weniger die mangelnde Allgemeingültigkeit,

---

128) Vgl. S. 174

129) W. Karush and L. A. Moody: "Determination of Feasable Shipping Schedules for a Job-Shop", Operations Research, Vol. 6 (1958), pp. 35-55

sondern mehr grundsätzliche Bedenken sind aber der Anlaß, es mit diesen Hinweisen bewenden zu lassen. Es ist ein Widerspruch, auf der einen Seite durch fertigungstechnische und produkt-planerische Maßnahmen aller Art die Produktion zu verbilligen und zu vereinfachen, auf der anderen Seite aber die einfachste Art der Rationalisierung, nämlich durch bloße offenbar zweckmäßige Anordnung der Produktion, wegen zu enger im voraus festgelegter Terminschranken zu verhindern, indem die zu fertigenden Güter nicht als Komplex, sondern einzeln betrachtet werden. Bevor daher für den Einzelfall ein Rück-Rechnungsverfahren entwickelt wird, sollte geprüft werden, ob es tatsächlich erforderlich ist, den größten Teil der Produktion so stark zu binden, ob also das Ziel z.B. aus absatzwirtschaftlichen Gründen so eng gehalten und damit ein kleineres Optimum als bei freierem Ziel angestrebt werden muß. Stellt sich nämlich heraus, daß ein wesentlicher Teil der für eine Periode geplanten Produktion beliebig in der Periode gefertigt werden darf und man nur die voraussichtlichen Fertig-Termine gern vorher wissen will (und diesen Wunsch erfüllen ja die erörterten Planungsverfahren), so erübrigt sich ein solches Rückrechnungsverfahren. Ist das nicht der Fall, so werden - wie gezeigt - die Möglichkeiten der Stationen zur Permutation der zu fertigenden Lose stark eingeengt. Ehe man sich dann ein Rückrechnungs-Planungsverfahren ausarbeitet, ist daher zu prüfen, ob nicht eine einfache Rechnung, die lediglich für Vollbeschäftigung der Stationen sorgt, so daß die Durchlaufzeiten um einen Mittelwert schwanken, die aber Produktwartezeiten nicht weiter berücksichtigt und auf die Untersuchung des Effektes von Reihenfolgevertauschungen verzichtet, praktisch zum gleichen Ergebnis kommt. Läßt sich das bestätigen, so läuft das Planungsverfahren auf eine einfache fortlaufende Addition hinaus, bei der - unter der Voraussetzung gewisser Zwischenlager - den Stationen (bzw. Maschinen) die Güter mit ihren Bearbeitungszeiten fortlaufend zum erforder-

lichen Termin oder, wenn dieser besetzt ist, zu einem möglichst nahen früheren Termin zugerechnet werden. Widersprüche in den End-Terminforderungen (z.B. wenn zu einem Termin mehr gefordert wird, als bis dahin kapazitätsmäßig überhaupt produziert werden kann), äußern sich dann darin, daß einige Güter bis zu den gewünschten Endterminen den Kapazitäten nicht zugeordnet werden können, weil diese schon vollständig besetzt sind. Das gleiche Ergebnis liefert dann auch ein manuell aufgestelltes Durchflußdiagramm, wie es - mit vielerlei visuell-mechanischen Hilfsmitteln - häufig Anwendung findet.

Hier zeigt sich - nebenbei angemerkt - wieder deutlich, daß die exakten Planungsverfahren auch im Kleineren die prinzipiell ökonomischen Entscheidungen nicht ersetzen können, vielmehr diese voraussetzen. Auch für ökonomisch schlechte Verhaltensvoraussetzungen lassen sich optimale Verfahren angeben. Ökonomisch interessant sind bei exakten Planungsverfahren also weniger die Lösungen als vielmehr die Ansätze und die dafür festgelegten Voraussetzungen. Erst beim Ansatz zu exakten Planungen und seinem Zwang zur Formalisierung der Grundgegebenheiten wird zuweilen nämlich deutlich, daß das vorausgesetzte Ziel durch "bessere" Ziele ersetzt werden könnte und sollte. Dies läuft auf eine Besinnung und Klärung hinaus, wie die in einen Planungsansatz einsetzbaren Ziele dem stets vorhandenen höheren Ziel dienen.

3. Probleme der Produktionsplanung bei Einzelfertigung und Mischformen der Fertigungsbedingungen

Bei den bisherigen Erörterungen wurde - wie auf Seite 6 erläutert und bei der Skizzierung der Voraussetzungen zu den Problemansätzen meist indirekt ausgesagt, dadurch daß von "Losen" gesprochen wurde - davon ausgegangen, daß der Produktionsplanung eine Massen- und Serienfertigung zu Grunde liegt. Haben nun die angestellten Überlegungen auch für die Einzelfertigung Gültigkeit und Bedeutung? Oder, anders gefragt, ist die zu fertigende Stückzahl entscheidendes Kriterium für die Produktionsplanung?

Grundsätzlich sind offenbar bei der Produktionsplanung der Einzelfertigung die gleichen Probleme zu lösen wie bei der Fertigung größerer Stückzahlen eines Gutes, sofern in einem Betrieb mehrere Produkte simultan hergestellt werden; es sind Fertigungseingabe, Fertigungsdurchlauf durch die Stationen oder Arbeitsgänge und die auch hier möglicherweise entstehenden Zwischenlager zu regeln. Die mit den Losgrößen zusammenhängenden Fragen treten allerdings nicht auf. Nur bei handwerklicher Fertigung und bei der Fertigung eines einzigen Gutes während der Planungsperiode (z.B. im Montage-Schiffbau) sind die Planungsprobleme anderer (hauptsächlich organisatorischer und technischer) Natur. Dieser Fall soll aber in dieser Arbeit, die sich mit dem Mehrprodukten-Fall beschäftigt, nicht weiter erörtert werden. Wenn hier von Einzelfertigung gesprochen wird, so ist damit die gleichzeitige arbeitsteilige, industriell-fabrikatorische Fertigung mehrerer Güter in sehr kleinen Stückzahlen gemeint, wie sie vielfach etwa bei Betrieben auftritt, die (auf Bestellung und in vielfältigen Ausführungen) Investitionsgüter im weitesten Sinne herstellen (z.B. Maschinenbau, Elektrotechnik u.ä.).

Ist die Zahl der in einer Planungsperiode zu erzeugenden Einzel-Güter groß und handelt es sich um Güter, die sich im Prinzip sehr ähnlich sind und viele gleiche Bauelemente haben, so kann in Wirklichkeit teilweise wieder eine Serienfertigung vorliegen, wie es sich bei den Überlegungen zum Problem der Teile-Einsatzplanung (vgl. S. 78 ff.) zeigte. Läßt man die Montage-Stationen außer acht, so bleiben in solchen Fällen alle Probleme, wie sie oben dargestellt wurden, bestehen, und die Lösungen behalten ihre Gültigkeit.

Wie steht es aber bei der "echten" Einzelfertigung bei der auch die Bauelemente in kleinsten Serien und wechselnden Ausführungen gefertigt werden? Zuordnungsprobleme (vgl. Abschnitt 2.1, S. 10 ff.) entstehen bei der Einzelfertigung gleichermaßen wie bei der Massen- und Serienfertigung. Auch für die Einzelfertigung ist die Art der Anpassung an Schwankungen des Absatzplanes (bzw. der gewünschten Liefertermine) zu entscheiden ebenso wie das Ausmaß von Eigenfertigung und Fremdbezug. Hier werden allerdings die technischen Gesichtspunkte den ökonomischen Entscheidungsspielraum mehr eingrenzen als bei der Massen - oder Serienfertigung, weil Einzelfertigung zumeist auch Eingehen auf spezielle Kundenwünsche bedeutet und diese bei Eigenfertigung besser berücksichtigt werden können. Die oben formulierten linearen Planungsansätze hierfür bleiben aber gültig und können unmittelbar verwendet werden. Handelt es sich nur um wenige Güter, so kann das Ergebnis sich u.U. schon aus der Anschauung heraus feststellen lassen und eine Durchrechnung sich erübrigen. In jedem Falle wird die Planungsaufgabe in ihrem Zahlenumfang kleiner werden.

Der Zuordnung der Güter auf die betriebsmöglichen Fertigungsverfahren kann bei der Einzelfertigung noch mehr Bedeutung zukommen als bei der Massen-oder Serienfertigung. Bei der Massen- und Serienfertigung werden die Produkte prinzipiell auf längere Zeit in der gleichen Ausführung und Art hergestellt,

so daß es sich lohnt, das technisch vollkommenste Verfahren dafür vorzusehen und die entsprechenden Werkzeuge für die meist schon stark spezialisierten Maschinen und Arbeitsgänge bereitzustellen. Ist das der Fall, so besteht - zumindest kurzfristig - kaum eine Wahl zwischen mehreren Bearbeitungsverfahren[130]. Für die Einzelfertigung verwendet man dagegen vermehrt Universalmaschinen und die Arbeitskraft von geschulten (Fach-)Arbeitern, um den häufig wechselnden Anforderungen an Art und Ausführung der Werkstücke schneller und leichter gerecht werden zu können. In diesem Falle ist es sehr viel leichter möglich, den gleichen Arbeitsgang auf verschiedene Weise zu vollziehen. Da nun wegen des häufigen Wechsels der Güter die Belastung der einzelnen Arbeitsstationen stark schwanken kann, ist es, um die Gesamtkapazität auszunutzen, nahezu unumgänglich, die Belastungen durch Substitution zwischen mehreren möglichen Bearbeitungsverfahren auszugleichen. Gerade bei Einzelfertigung kommen den verschiedenen Verfahren auch verschiedene Kostenwerte für das gleiche Gut zu. Die Rechnung zur Auswahl der insgesamt kostengünstigsten Fertigungsverfahren für die Einzelproduktion mehrerer Güter zugleich ist also nahezu ein Paradebeispiel für die Anwendung des linearen Planungsansatzes oder seiner Weiterungen.

Ob eine geregelte Ablaufplanung bei Einzelfertigung vonnöten ist, dürfte noch mehr als bei der Massen- oder Serienfertigung vom speziellen Fall abhängen. Generell entfällt lediglich das Problem der optimalen Losgröße und der losgrößenabhängigen Zwischenlager. Sind die Fertigungszeiten in den Bearbeitungsstationen relativ zur Planungsperiode groß, und das ist bei Einzelfertigung in der Regel der Fall, so sind auch hier Maschinenbelegungspläne nach Art der Figuren 16 und 17 (S. 131 f.) erforderlich. Auch bei der Einzelfertigung können also

130) Vgl. auch S. 59

Maschinen- bzw. Produktwartezeiten auftreten, die es - gewichtet mit ihren Kosten - wiederum zu minimieren gilt. Ist das der Fall, so läßt es sich sehr leicht denken, daß das Problem der Abhängigkeit der Maschineneinrichtezeiten und -kosten von der Produktionsreihenfolge der Güter auch bei der Einzelfertigung mit dem Ablaufplanungsproblem verknüpft ist. Dies insbesondere deshalb, weil die Vorrichtungen und Vorarbeiten, die man für ein Gut braucht, vielfach auch so angeordnet werden können, daß sie zugleich für ein anderes Gut mehr oder weniger brauchbar sind. Das oben angegebene Näherungsverfahren kann hierfür allerdings u. U. wenig tauglich sein, weil die dort vorgesehene Klasseneinteilung sich dann nicht aufstellen läßt, wenn die Art der Güter und ihrer Bauelemente nicht über eine längere Zeit konstant ist, sondern die Güter jedesmal mehr oder weniger neu konstruiert sind. Handelt es sich um nur wenige gleichzeitig zu fertigende Güter, so läßt sich ein guter Fertigungsablauf schon aus der Anschauung erkennen; handelt es sich um viele Güter, so werden entweder die Bauelemente sich irgendwie wiederholen, so daß eine Klasseneinteilung möglich wird, oder man greift auf das Zufalls-Eingabeverfahren zurück und läßt den Stationen durch Zwischenlagerzeiten eine Auswahlmöglichkeit bei der Reihenfolge der Bearbeitung der Güter (vgl. S. 175 ff).

Das Ergebnis ist also, daß sich die Probleme der Produktionsplanung bei der Massen- und Serienfertigung im Prinzip nur graduell von denen bei der simultanen Einzelfertigung mehrerer Güter unterscheiden, und daß die möglichen rechnerischen Ansätze zur Lösung dieser Probleme für beide Fertigungsbedingungen geeignet sind. (Unterschiede werden vor allem im Bereich der Absatzplanung liegen, die daher rühren, daß Einzelfertigung in der Regel auf Bestellung, Massen- und Serienfertigung dagegen für einen anonymen Markt aufgrund von Annahmen über den Absatz vorgenommen wird.) Dabei soll aber

nochmals betont werden (vgl. S. 6), daß dies uneingeschränkt nur gilt, wenn in jedem Fall die Fertigung in Form der Werkstattfertigung oder Reihenfertigung ohne Zeitzwang[131] vor sich geht. Wird in Form der Reihenfertigung mit Zeitzwang[131] (Fließfertigung) gefertigt, wie es zumindest für die Massen- oder Serienfertigung auch in Frage kommt, so treten dort durch den Zwang zu zeitlicher und kapazitativer Harmonisierung (zusätzlich) andere, hauptsächlich organisatorische, Probleme auf, die bei der Werkstattfertigung nicht oder in anderer Form entstehen. Vergleicht man Probleme der Produktionsplanung für die verschiedenen Gegebenheiten Massen- und Serienfertigung und Einzelfertigung, so muß man notwendig von einheitlichem Fertigungsverfahren ausgehen. Hier wurde von einer Fertigung in geschlossenen Losen stationsweise auf nur einem Aggregat und ungleicher Stationenreihenfolge für die Güter (also Werkstattfertigung oder Reihenfertigung ohne Zeitzwang) ausgegangen. Aggregat kann dabei natürlich auch bedeuten, daß partiell in dieser Station mehrere Arbeitsgänge fließmäßig nacheinander vollzogen werden. Solange nicht alle Produkte die gleiche Reihenfolge haben, solange also eine Einteilung in Stationen und ihre Einzelbetrachtung vonnöten ist, solange liegt keine geschlossene, totale Fließfertigung vor, und es besteht ein ständig wechselndes zeitliches und kapazitatives Koordinierungsproblem, gleichgültig, wie groß die Lose sind. Da es um diesen allgemeinen Fall, der also grundsätzlich unabhängig von der Stückzahl der zu fertigenden Güter ist, in den Erörterungen hier geht, braucht die für die Produktion von Massen und Serien prinzipiell auch mögliche totale Fließfertigung, die in Hinblick auf die Koordinierungsaufgabe nur einen speziellen und in dieser Sicht problemärmeren Fall darstellt, nicht gesondert betrachtet zu werden.

---

131) Vgl. E. Gutenberg: Grundlagen ..., 1. Band, a.a.O., 8./9. Auflage, S. 76

Ganz spezielle Fragen wirft die Fertigung inhomogener Massengüter auf. Massenfertigung schlechthin bedeutet die Fertigung hoher Stückzahlen eines gleichartigen Produkts. Wenn nun diese Gleichartigkeit nicht gegeben ist, sondern es von dem Produkt verschiedene Arten, Formen, Größen und Abwandlungen gibt, die alle in größeren Stückzahlen hergestellt werden sollen, so liegt weder die oben skizzierte Einzelfertigung noch die einfache Massen- und Serienfertigung vor, sondern man kann von inhomogener Massenfertigung sprechen. Bestes Beispiel für diese Art der Fertigung sind die Industrien, deren Produkte durch die Mode stark beeinflußt werden, wie Textilindustrie, Lederwarenindustrie u.ä. Die Sonderheiten gegenüber dem bisher Erörterten tauchen dann auf, wenn die einzelnen Varianten des Grundprodukts unterschiedliche Belastungen oder Reihenfolgen der Arbeitsstationen oder sogar unterschiedliche Arbeitstechniken für den gleichen Arbeitsgang erfordern. Theoretisch kann man freilich für jeden Typ des Grund-Produkts eine Aktivität im Sinne der linearen Planungsrechnung definieren und die gewünschten Mengen je Typ zu Serien zusammenfassen. Praktisch ist es aber u.U. nicht möglich, mit allen Aktivitäten simultan zu rechnen, nämlich dann, wenn die Zahl der Typen zu groß ist, wie etwa bei der Schuhfabrikation, wo man in einer Saison auf bis zu 200 000 Damenschuhvarianten kommt[132)]. Zwar sind für einen gegebenen Absatzplan in einer Planungsperiode viele Varianten des Gutes herzustellen, die Produktionsplanung ist aber bestrebt, nacheinander möglichst wenige Typen gleichzeitig und diese in hohen Stückzahlen vorzusehen, um die Vorteile der Mengendegression auszunutzen. Dabei kann es aber von Vorteil sein, die Mengen eines Typs nicht einmal in einer Serie zusammenzufassen, sondern auf verschiedene Zeiträume innerhalb der Planungsperiode aufzuspalten, nämlich dann, wenn nur Teilserien verschiedener Typen sich günstig zu Unterprogrammen (s. unten) zusammen-

stellen lassen. Folgende Aufgaben und Ziele bestehen nämlich in diesem Falle:

1. Es sollen nacheinander aus dem Gesamtprogramm solche Unterprogramme und Mengen zusammengestellt werden, daß das Gesamtprogramm erfüllt wird und daß die von den Unterprogrammen angesprochenen Kapazitäten gleichmäßig ausgelastet werden.

2. Es ist zu entscheiden, wieviel Typen jeweils für ein Unterprogramm vorzusehen sind, und es ist ein Verfahren zu entwickeln, nach dem die Typen dann so ausgewählt werden, daß Forderung 1 erfüllt werden kann.

Auf die Technik zur Lösung dieses Problems soll hier nicht ausführlich eingegangen werden, sie hängt auch sehr stark vom gegebenen Fall ab; ein Beispiel hierfür gibt Poklekowski[132].

Die zweite Frage enthält die Vorfragen des Problems. Wieviel Typen je Unterprogramm günstig bzw. notwendig sind, läßt sich nicht ohne weiteres sagen; die fertigungstechnische Organisation dürfte hierfür ausreichende Hinweise geben. Geht man davon aus, daß die Zahl der Typen je Unterprogramm feststeht, so bleibt zu klären, welche Typen zu einem Unterprogramm kombiniert werden sollen. Erst dann kann die erste Frage, in welchen Mengen die Typen je Unterprogramm auszubringen sind, beantwortet werden.

Das Problem, die geeignete Kombination von Typen zu einem Unterprogramm zu finden, ähnelt dem Problem bei der oben angegebenen Iteration für die Reihenfolgebestimmung bei losreihenfolgeabhängigen Maschinenumstellzeiten und ungleicher Maschinenreihenfolge der Lose (vgl. S. 171 ff.). Dort galt es, die Termin-

---

132) W. Poklekowski: "Probleme inhomogener Massenfertigung". Bürotechnik und Automation, 1. Jg. (1960), S. 93-98, hier S. 93

und Umstellklassen so aufzufüllen (d.h. fortlaufend ein solches Los auszuwählen), daß die Klassenwertsummen jeweils etwa die gleiche Höhe erreichten. Hier gilt es, die Typen für ein Unterprogramm so auszuwählen, daß die gleichmäßige Kapazitätsauslastung für alle angesprochenen Arbeitsgänge oder Stationen gewährleistet werden kann. Prinzip und Ziel sind also die gleichen. Aus einer Aufstellung der von den Typen angesprochenen Arbeitsgänge lassen sich ohne Schwierigkeiten solche Typen zusammenstellen, die alle Arbeitsgänge beanspruchen. Die dann folgende Frage nach den Mengen je Unterprogramm läßt sich als lineares Programm formulieren; die technischen Koeffizienten sind die Fertigungszeiten je Arbeitsgang, eingrenzende Schranken sind die Kapazität der Arbeitsstationen je Zeiteinheit und die geforderten Mengen je Typ des Gesamtprogramms. Zusätzliche Bedingung kann noch sein, daß einige Mengen eines Unterprogramms fest vorgeschrieben werden in der Weise, daß gefordert wird, diese Typen in der gesamten Fertigungszeit des Unterprogramms ständig vorzusehen; das kommt in Frage, wenn diese Mengen Teil einer größeren Serie sind, das nächste Unterprogramm diesen Typ wieder enthalten soll und somit - trotz der Aufteilung der Serien auf Unterprogramme - die Serien geschlossen gefertigt werden sollen, m.a.W. ein sinnvoller Anschluß der Unterprogramme aneinander gewährleistet sein soll. Als Maximierungskriterium kann die Fertigungszeit verwendet werden, denn es ist offenbar dispositions- und kostenmäßig am günstigsten, mit einem Unterprogramm möglichst lange zu fahren. Das erspart es, für jeden Arbeitsgang für jeden Typ Kosten ermitteln zu müssen, um nach Kostenkriterien die Aufgabe zu lösen. Ob beide Zielsetzungen zum gleichen Ergebnis führen, muß beim Einzelfall kontrolliert werden. Dies ist z.B. nicht der Fall, wenn einzelne Arbeitsgänge auf verschiedene Weise bewerkstelligt werden können und zugleich deren Auswahl getroffen werden soll. Zeitmaximierung würde hier dazu führen, daß gerade

die ungünstigsten Fertigungsverfahren ausgewählt werden. Die Formulierung als lineares Programm hat im übrigen noch den Vorteil, daß die nicht ausgenutzten Kapazitäten in der Lösung besonders ausgewiesen werden, so daß diese kurzfristig auf andere Stationen - falls möglich - teilweise umdisponiert werden können, was die Gesamtausbringung des Betriebes erhöht. Auf diesen Ausgleich kommt es gerade bei solch verwickelten Fällen wie der inhomogenen Massenfertigung an, die immer unübersichtlich sind.

4. Schlußbetrachtung: Die ökonomische Bedeutung exakter und quantitativer Produktionsplanungsmethoden

Wachstum, Konjunktur und Beschäftigung, Struktur und Verteilung sowie, daraus zum Teil resultierend, Geldwert sind Probleme, um die letztlich sowohl in ihren Zusammenhängen als auch in ihrer Axiomatik Wirtschaftstheorie und Wirtschaftspolitik bemüht sind. Diese Größen können durch zentrale Planungen und Entscheidungen (vornehmlich vom Staat) und durch dezentrale Planungen und Entscheidungen (von den Unternehmen und Haushalten) beeinflußt werden. Geht nun von veränderten (und verbesserten) Produktionsplanungen der Unternehmen auch ein Einfluß auf eine dieser Größen möglicherweise aus; kommt also den Produktionsplanungsmethoden mit ihren einzelwirtschaftlichen Wirkungen und Fortschritten auch eine nicht nur ganz allgemeine gesamtwirtschaftliche Bedeutung zu? Es sei diese Frage, die über das vorliegende Thema hinausgeht, zum Schluß mehr aufgeworfen als schlüssig beantwortet.

Eine primäre Wirkung der Art der Produktionsplanungen in den Unternehmen auf Wachstum und Geldwert kann wohl verneint werden. Das Wachstum der Volkswirtschaft wird in erster Linie durch das Investitionsverhalten insgesamt, aber wohl kaum durch die kurz- und mittelfristige Produktionsplanung bestimmt. Ein Einfluß auf den Geldwert käme aus den Unternehmen höchstens von Seiten der Preispolitik; diese steht aber mit der Produktionsplanung nur in einem indirekten Zusammenhang. Die Entwicklung der Größenstruktur der Unternehmen in der Volkswirtschaft und das konjunkturelle Verhalten der Unternehmen könnten dagegen schon eher durch die Art und Güte der Produktionsplanung beeinflußt werden.

Festgehalten sei nochmals, daß hier von einem gegebenen Absatzplan und von gegebenen Preisen für die Produkte und die

Einsatzfaktoren ausgegangen wurde. Unter Produktionsplanung haben wir also nur die innerbetriebliche Anpassung an Gegebenheiten des Marktes verstanden, nicht aber das Verhalten im Markt durch Preis- und Absatzpolitik selbst. Daß hier allerdings Wechselbeziehungen bestehen, wurde mehrfach angedeutet.

Was ist, so gesehen, der Sinn quantitativer Produktionsplanungsmethoden und was folgt daraus? Die Ziele der Produktionsplanung wurden schon bei der Skizzierung der Probleme S. 3 erwähnt; sie bedeuten im Grunde: Erfüllung des ökonomischen Prinzips. Sachgemäße Produktionsplanung führt also zu einer Rationalisierung und damit zu steigender Produktivität, das gilt einzelwirtschaftlich wie gesamtwirtschaftlich. Wenn der zusätzliche Aufwand rechnerischer (exakter oder näherungsweiser) Planungsmethoden geringer ist als ihr zusätzlicher Nutzen, so sind sie in jeder Hinsicht von Vorteil und ein weiterer Schritt zu diesem Ziel. Allerdings können sich durch die Anwendung quantitativer Planungsmethoden Tendenzen, die auch den nicht oder weniger exakten Planungsmethoden schon innewohnen, mehr verstärken als beabsichtigt und erwünscht. Jede betriebliche, in die Zukunft gerichtete Planung zeigt methodisch umso bessere Ergebnisse, je längerfristig sie ausgelegt ist. Das gilt insbesondere für die rechnerischen Planungen, da diese vermöge ihres Kalküls in der Lage sind, auch mehrere und größere Perioden "richtig zu überschauen". (Ein Beispiel dafür ist die oben behandelte Produktionsglättung). Der Übergang zu den eigentlich quantitativen Produktionsplanungsmethoden fordert also längerfristige Absatzprognosen mit ihren Unsicherheiten heraus. Werden diese gemacht - und wenn auch mit den besten Methoden-, so wird durch die auf ihnen beruhenden Entscheidungen der Betrieb in der Regel mit einem erhöhten Zukunftsrisiko belastet werden. Zwar sind gerade die quantitativen Planungsmethoden dazu geeignet, mechanisiert (im übertragenen Sinne)

zu werden, so daß auch in kurzen Abständen neue Pläne ermittelt werden können; aber was nützt das, wenn der Betrieb auf den alten Plan eingerichtet wurde und die Umstellung auf den neuen Plan gar nicht so schnell bewerkstelligt werden kann und noch dazu gewisse Kosten verursacht! Freilich ist das im wesentlichen nur eine Frage der Fristen, der organisatorischen Schwerfälligkeit und der Möglichkeiten der kurzfristigen technischen Umstellung; dennoch bleibt in jedem Falle die Tendenz, einen einmal gewählten Plan möglichst lange durchzuhalten. Der "schwarze Peter" ist damit den Absatzprognosen zugeschoben; denn je besser diese sind, umso mehr ist es möglich und gerechtfertigt, langfristig zu planen und bei einem Produktionsplan zu bleiben.

Gelingt das, so können im Gefolge verbesserter Produktionsplanungen u.a. folgende Effekte auftreten: Es ist eine gleichmäßigere Beschäftigung möglich, die Liefertermine werden sicherer und die zwangsweisen Lagerinvestitionen werden geringer.

Warum sind gerade diese Wirkungen hier herausgegriffen? In allen unseren Erörterungen wurde deutlich, daß die exakten Produktionsplanungsmethoden gerade für die nicht ohne weiteres überschaubaren, in den Zahlen umfangreichen und im Problem komplexen Planungen geeignet sind. Das bedeutet, daß diese besonders für den größeren Betrieb eingesetzt werden können. Hätten dadurch die größeren Betriebe einen strukturellen Vorteil, so müßte sich dieser auf die Dauer auf die Betriebsgrößenstruktur in der Volkswirtschaft auswirken.

Es ist nicht anzunehmen, daß hier tatsächlich ein Vorteil der "Großen" gegenüber den "Kleinen" besteht. Große Betriebe sind wegen ihrer schon erwähnten speziellen maschinellen Ausrüstung und Schwerfälligkeit und der ihrer Organisation immanenten retardierenden Momente gezwungen, längerfristig zu planen.

Wenn es ihnen u.a. vermöge exakter Produktionsplanungsmethoden nun gelingt, diese Planung - vom Risiko der Absatzplanung in die Zukunft abgesehen - gut zu gestalten, so gleichen sie damit lediglich einen Nachteil aus, den sie gegenüber den "Kleinen" haben, die dieser mangelnden Anpassungsfähigkeit sehr viel weniger unterliegen und es gar nicht so nötig haben, langfristig zu planen[133]. Weil die Vielfalt der Ausrüstungen bei den "Kleinen" geringer sein wird, die Probleme also einfacher liegen, dürfte der nicht exakt aufgestellte Produktionsplan der "Kleinen" - wenn auch für seine kürzere Frist - in Bezug auf die zu beeinflussenden Größen nahezu den gleichen Effekt erzielen wie ein exakt aufgestellter Plan; ist das ausnahmsweise nicht der Fall, so kann ohne weiteres auch hier auf die exakten Planungsmethoden zurückgegriffen werden. Das Argument, daß die "Kleinen" schlechter planen müssen[134], ist also selbst dann in der Regel nicht stichhaltig, wenn man einmal davon ausgeht, daß die Anwendung der exakten Planungsmethoden für die "Kleinen" schwieriger ist (was durchaus bestritten werden kann). Somit bleibt festzustellen, daß die Entwicklung verfeinerter Produktionsplanungsverfahren gesamtwirtschaftlich primär strukturneutral sein dürfte.

Sekundär gilt das u.U. nicht mehr, wenn sich aufgrund veränderter Produktionsplanungen (und besonders ihrer Fristen) ein

---

133) Diese Argumentation verwendet bereits D. Pohmer in seinem Aufsatz "Über die Wechselbeziehungen von Unternehmungskonzentration und Konjunktur", in: Konjunkturelle Stabilität als wirtschaftspolitische Aufgabe, (Schülergabe für Woldemar Koch) herausgegeben von G. Zeitel und J. Pahlke, Tübingen 1962, S. 1-31, hier S. 27. Er betrachtet diese Umstände vom Thema her freilich in größerem Rahmen, insbesondere auch in Hinblick auf die Investitionsplanung.

134) So etwa H. Bayer: Das Unternehmen als Wirtschaftsstabilisator, I. Das Großunternehmen, Forschungsberichte des Landes Nordrhein-Westfalen, Nr. 907 (als Manuskript gedruckt) Köln und Opladen 1960, S. 59/60, S. 117 und passim.

anderes Verhalten gegenüber konjunkturellen Schwankungen ergibt und dieses wiederum sich auf die Wirtschaftsstruktur auswirkt. Wir hatten festgestellt, daß die Umstellung auf verbesserte Produktionsplanungen einen gewissen Einfluß auf die konjunkturell relevanten Größen Beschäftigung, Liefertermine und Lagerinvestitionen schließlich haben kann. Da nun diese verbesserten Planungen zugleich längerfristig sind, und da sie vornehmlich von den größeren Betrieben angewandt werden, werden die genannten Größen gerade bei diesen beeinflußt werden. Den "Großen" kann daher auf die Dauer und im Durchschnitt ein anderes Verhalten im Verlauf der Konjunktur angemessen sein als den "Kleinen". Es überstiege den Rahmen dieser Arbeit, dieses Verhalten im einzelnen zu analysieren; es sei auf die Ausführungen Pohmers verwiesen. Er kommt zu dem Schluß, daß unter gewissen Umständen im Gefolge des unterschiedlichen Investitionsstandes und -verhaltens der "Großen" und der "Kleinen" bei konjunkturellen Bewegungen auch Änderungen der Größenstruktur in der Wirtschaft auftreten können[135]. Dieser Prozeß kann offenbar durch die Art der Produktionsplanung verstärkt werden; denn die Unterschiede in der Anpassung an Wechsellagen erklären sich außer aus der unterschiedlichen Investitionsplanung und -ausnutzung zu einem gewissen Teil (und wohl besonders bei den kleinen Schwankungen der Konjunktur) auch aus der unterschiedlichen Produktionsplanung und ihren Fristen.

Den exakten Produktionsplanungsmethoden mit ihrem Hang zu längeren Planungsfristen folgen also nicht nur die mehr oder weniger auf der Hand liegenden einzelwirtschaftlichen Vorteile, sondern diese können einen - wenn auch sicherlich geringen, so doch zweifellos vorhandenen - Einfluß auf die Entwicklung und die Zusammensetzung der Gesamtwirtschaft und damit - trotz ihres einzelbetrieblich-technischen Charakters - eine spezielle

---

135) D. Pohmer: Über die Wechselbeziehungen ..., a.a.O., S. 3 ff., S. 15/16, S. 18/19

ökonomische Bedeutung haben. Die Analogie zur Frage nach der Priorität von Ei oder Henne bietet sich hier an, nämlich die Frage, ob durch die Entwicklung verbesserter Produktionsplanungen der gesamtwirtschaftliche Effekt erzeugt wird oder ob im Gefolge von (anderweitig erzeugten) Strukturänderungen die verbesserten Planungsmethoden angeregt und entwickelt werden; ihre Erörterung ändert aber - wie auch die Antwort ausfällt - am ökonomischen Ergebnis nichts.

Mit dieser Erkenntnis soll nun nicht etwa den Produktionsplanungsmethoden allein eine besondere Wichtigkeit oder zentrale Stellung sowohl im einzelnen Betrieb als auch in der Gesamtwirtschaft zugemessen werden. Diese Bedeutung kommt vielmehr zu einem gewissen Teil den Methoden (und Fristen) der Absatzprognosen und -planung zu. Die Produktionsplanung und die dafür zu verwendenden Methoden richten sich letztlich nach der Absatzplanung - auch wenn sie diese veranlassen oder anspornen. Die Methoden der Produktionsplanung sind nur eine Technik im ökonomischen Bereich ähnlich wie die technologischen Fertigungsverfahren im technischen Bereich. Da sie dementsprechend weitgehend wirtschaftssystem-indifferent sind, können sie auch im System der Marktwirtschaft die eigentlichen und echten unternehmerischen Entscheidungen nicht ersetzen, sondern nur zahlenmäßig untermauern und deren Folgen in gewisser Weise angeben[136]. Sie tragen damit zu der Versachlichung der einzelwirtschaftlichen Entscheidungen bei und führen diese auf die nicht mehr quantifizierbaren, vom Unternehmer in dieser oder jener Form selbst einzuschätzenden und anzunehmenden Faktoren zurück, mögen dadurch, daß sie die Tendenz verstärken, die

136) In der Terminologie Gutenbergs: Die rechnerische Produktionsplanung berührt lediglich die "rationale" und schließlich die "gestaltend-vollziehende Schicht" des dispositiven Faktors, setzt aber die "irrationale Schicht" voraus. Vgl. E. Gutenberg: Grundlagen ..., 1. Bd., a.a.O., 8./9. Aufl., S. 103

Planung möglichst langfristig auszurichten und einen gewählten Plan beizu behalten, ceteris paribus eine stabilisierende Wirkung erzeugen, mögen dadurch womöglich auch noch zur sachgerechten Investitionsplanung beitragen, sie setzen aber eine entsprechend befristete Absatzplanung voraus, und hier liegen ihre Wirkungsgrenzen. Die Produktionsplanung ist also nur ein Baustein im Planungssystem der Unternehmungen und deren Einfluß auf die Gesamtwirtschaft. Es ist aber sinnvoll, diesen Teil der betrieblichen Planung, der sich wegen seiner objektiven Verbundenheit mit den technischen Gegebenheiten des einzelnen Betriebes noch am ehesten quantifizieren läßt, so gut wie möglich zu gestalten; und dazu gehört wegen seines mehr pragmatisch-technischen und (nach Entscheidung für ein Ziel im weiteren Verlauf) werturteilsfreien Charakters, ihn zu formalisieren und zu berechnen. Es "ist nicht zu leugnen, daß die Qualifikation zur unternehmerischen Leistung eine spezielle Begabung voraussetzt, den Weitblick Erfolgsmöglichkeiten aufzuspüren und den Wagemut, vor Ungewißheiten nicht zurückzuschrekken. Das ändert nichts an der Tatsache, daß im 'Management' eine Gestaltungsaufgabe liegt, bei der Entscheidungen rechenhaftig gemacht werden müssen, und daß der unternehmerische Erfolg nicht nur auf Intuition zu begründen ist."[137]

---

137) K. Brandt: Preistheorie, Ludwigshafen a. Rh. 1960, S. 180

5. Zusammenfassung

Unterscheidet man die einzelwirtschaftlichen Entscheidungen in grundsätzliche, konstitutive und laufende, dispositive, so sind die meisten Probleme der kurz- und mittelfristigen Produktionsplanung des Mehrprodukten- Mehrstufenbetriebes zu den dispositiven Entscheidungsaufgaben zu rechnen, sofern man unter Produktionsplanung lediglich die Aufgabe versteht, die entsprechend einem gegebenen Absatzplan in einer Planungsperiode zu fertigenden Produkte so auf die Betriebskapazitäten aufzuteilen, daß das (kurz- und mittelfristig gesetzte) Betriebsziel erreicht wird. Akzeptiert man die hierin vorgenommene Unterscheidung in Produktionsplanung und Absatzplanung, so hat - im Gegensatz zur Absatzplanung - die Produktionsplanung einen pragmatisch-technischen und (nach Entscheidung für ein Ziel im weiteren Verlauf) werturteilsfreien und im Wesen quantitativen und nicht einen eigentlich ökonomisch-unternehmerisch-planerischen und im Wesen qualitativen Charakter. Das besagt, daß ein großer Teil der Produktionsplanungsprobleme mathematisch erfaßbar und rechnerischen exakten oder näherungsweisen Planungsmethoden zugänglich ist.

Die Probleme der Produktionsplanung im Mehrprodukten-Mehrstufenbetrieb lassen sich prinzipiell klassifizieren in Zuordnungsprobleme und Ablaufprobleme.

Zuordnungsprobleme entstehen, wenn die Produkte oder Mengen (Aktivitäten) den beschränkten Kapazitäten, Verfahren oder Zeiträumen (Faktoren) entsprechend einem Zielkriterium zugewiesen werden sollen und die Faktoren für mehrere Aktivitäten eingesetzt werden können. Hat man es mit mengenproportionalen Ziel-Koeffizienten für die möglichen Aktivitäten zu tun (beim Kostenkriterium also mit konstanten variablen Stückkosten, d.h. mit konstanten Grenzkosten), so kann ein linearer Planungsansatz zur simultanen Ermittlung der besten Kombination von Aktivitäten

und Faktoren aufgestellt werden. Da diesem eine grundsätzliche Bedeutung zukommt, werden im ersten Teil der Arbeit seine Prinzipien, sein Zusammenhang mit der traditionellen Produktionstheorie und dem Ertragsgesetz und die Grenzen in seiner Anwendbarkeit, auch wenn man zu Weiterungen, wie etwa dem linearisierten konvexen Planungsansatz, übergeht, vorausgestellt, ehe für Produktionsplanungsprobleme wie den zeitlichen Produktionsausgleich, die Entscheidung über das Ausmaß von Eigenfertigung-Fremdbezug und die Zuordnung von Produkten auf mögliche Kapazitäten (Verfahren) einfache Planungsansätze formuliert und diskutiert werden. Bei diesen Ansätzen wird nicht auf besondere methodische Verfeinerungen Wert gelegt (über die Technik der linearen und nichtlinearen Programmierung gibt es ausführliche Literatur), sondern es soll gezeigt werden, wie und auf der Basis welcher Daten man zu derartigen Ansätzen kommt und was sie voraussetzen.

Die Ablaufprobleme hängen in ihrem Wesen mit der Mehrstufenfertigung zusammen. Sie entstehen bei Werkstattfertigung und Reihenfertigung ohne Zeitzwang (von der hier stets ausgegangen wird, weil die vollständige Fließfertigung in dieser Hinsicht problemärmer ist) dann, wenn durch bestimmte Anordnung und entsprechenden zeitlichen und mengenmäßigen Einsatz der Produktionsfaktoren ganz allgemein und ohne besonderen technischen Mitteleinsatz ein zeit- und/oder kostensparender Effekt erzielt werden kann. Ihre Kenngrößen sind Durchlaufzeiten, Produktwartezeiten (Zwischenlager), Maschinenwartezeiten und u. U. auch Maschinenrüst- und -umstellzeiten und deren Kosten. Die Aufgaben der Ablaufplanung bestehen hauptsächlich in der Teile-Einsatzplanung, der Bestimmung optimaler Losgrößen und der Maschinenbelegungsplanung (Durchflußplanung).

Die Teile-Einsatzplanung hat die Aufgabe, den mengenmäßigen und zeitlichen Bedarf an Einsatzgütern zu ermitteln, wenn die

Produkte eines Betriebes in der Weise miteinander verflochten sind, daß bestimmte Rohstoffe, Halbfabrikate oder Gruppen von Halbfabrikaten Einsatzgut für mehrere Zwischenprodukte und Endprodukte sind. Diese Aufgabe ist zwar, da der Teile-Einsatz unmittelbar aus der konstruktionstechnischen Zusammensetzung der Teile resultiert, kein theoretisch bedeutsames Problem (und enthält nur insofern ein Optimierungskriterium, als eine nicht exakte Teiledisposition zu erhöhten Wartekosten führen kann), aber sowohl die Mengenberechnung als auch die Terminplanung führt zu einer zahlenmäßig umfangreichen Rechenarbeit, die es zu systematisieren gilt. Es wird das auf einfache Matrizenoperationen zurückzuführende Schema der Mengenberechnung gezeigt und diskutiert und ein plausibles Näherungsverfahren für die Terminberechnung angegeben.

Die bekannten Formeln zur Berechnung der optimalen Losgröße fingieren entweder die Produktion einer Stufe oder gehen davon aus, daß bei Fertigung in Losen durch mehrere Stufen die Lose geschlossen, erst wenn alle Teile eines Loses in einer Stufe bearbeitet sind, zur nächsten Stufe weitergegeben werden. Die Fertigung in geschlossenen Losen setzt aber auch bei Werkstattfertigung dieses Verfahren, das zu Zwischenlagern gewisser (losgrößenabhängiger) Größe führt, nicht zwingend voraus; erforderlich sind vielmehr - wie gezeigt wird - nur niedrigere, vom Verhältnis der Bearbeitungsgeschwindigkeiten der Folgestufen abhängige Kumulations- bzw. Zerreißlager. Geht man von diesen Minimallagern aus, so verändern (vergrößern) sich auch die optimalen Losgrößen, ohne daß es zu längeren Durchlaufzeiten kommt. Wesentliches Kriterium sind hierbei die Transportkosten. Diese Beziehungen werden abgeleitet, und es werden ihre Grenzen kurz dargelegt.

Die Maschinenbelegungsplanung ist wegen ihres Reihenfolgecharakters methodisch am schwierigsten in befriedigender und

praktikabler Form zu greifen, ja sie führt unter gewissen Voraussetzungen zu bisher ungelösten mathematischen Problemstellungen (z.B. zum sog. Traveling-Salesman-Problem). Es wird über einige, bei kleinerem Problemumfang mögliche, exakte Lösungsverfahren und über Näherungslösungen berichtet, es wird ein ganzzahliges lineares Programm zur Lösung entwickelt, und es wird auf praktische Näherungsmöglichkeiten kurz hingewiesen, die allerdings u.U. recht dürftig ausfallen. An einem speziellen Fall - dem, daß die Umstellzeiten der Maschinen von der Reihenfolge der Lose abhängen - wird gezeigt, wie ein brauchbares rechnerisches Näherungsverfahren für eine solche Durchflußplanung aufgebaut werden kann.

Die rechnerischen Produktionsplanungsmethoden sind vor allem für die meist nicht ohne weiteres überschaubare Planung der Massen- und Serienfertigung mehrerer Produkte durch mehrere Stufen prädestiniert. Sie behandeln aber, wie ausgeführt wird, auch den Mehrprodukten-Mehrstufenfall bei Einzelfertigung. Die Planungsansätze vereinfachen sich höchstens, da z.B. alle mit den Losgrößen zusammenhängenden Fragen entfallen. Auf spezielle Probleme einer Mischform der Fertigungsbedingungen, der Fertigung inhomogener Massengüter, wird hingewiesen.

Fazit aller Überlegungen ist, daß eine Reihe von Produktionsplanungsaufgaben quantitativ gelöst werden kann, insbesondere da heute Rechenmaschinen vorhanden sind, die große Zahlenmengen sowohl bei einfachstem als auch bei anspruchsvollerem mathematischen Gehalt in sehr kurzer Zeit verarbeiten können. Das bedeutet aber, wie zum Schluß der Arbeit wiederholt wird, nur, daß die innerbetrieblichen Dispositionen besser gestaltet werden können, nicht dagegen, daß dadurch die in der Marktwirtschaft eigentlichen unternehmerischen Planungen, Erwartungen und Entscheidungen über Absatz und Investitionen ersetzt

werden könnten. Im Gegenteil, die Anwendung quantitativer Produktionsplanungsmethoden setzt Angaben über den zukünftigen Absatz voraus und bringt um so bessere Ergebnisse, je längerfristig die Absatzprognosen sind. Diesen wohnt aber bei dezentralisierten Unternehmensentscheidungen immer ein gewisses Maß subjektiven unternehmerischen Weitblicks inne, und sie sind stets dementsprechend - mit zunehmendem Planungszeitraum steigend - risikobehaftet. Diese Grenze in der ökonomischen Bedeutung exakter Produktionsplanungsmethoden wird auch nicht dadurch verschoben, daß zur Technik der Absatzprognostizierung und -planung selbst u.a. ähnliche Planungsansätze und -methoden verwandt werden können. Freilich ist die langfristige Absatzplanung kein Selbstzweck, sondern wird u.a. durch die Erfordernisse der Produktionsplanung erst veranlaßt, insofern ist also die Produktionsplanung ursächlich mit dem ökonomischen Risiko in der Absatzplanung verbunden; durch eine verbesserte Technik der Produktionsplanung wird aber dieses Risiko nicht vermindert.

6. Literaturverzeichnis

(Zugleich Namenregister; die in spitze Klammern gesetzten Zahlen < ... > verweisen auf die Seiten, bei denen das Werk angeführt wurde.)

6.1 Selbständige Bücher und Schriften

R. Ackoff: s.u. C. Churchman, R. Ackoff, E. Arnoff

R.G.D. Allen: Mathematical Economics
London 1957 < 2, 19 >

K. Andler: Rationalisierung der Fabrikation und optimale Losgröße, Dissertation, Stuttgart 1929
<103 >

A. Angermann: Gleichgewichtskalkulation
Meisenheim 1951 < 65 >

E. Arnoff: s.u. C. Churchman, R. Ackoff, E. Arnoff

H. Bayer: Das Unternehmen als Wirtschaftsstabilisator, I. Das Großunternehmen, Forschungsberichte des Landes Nordrhein-Westfalen Nr. 907 (Als Manuskript gedruckt) Köln und Opladen 1960 < 197 >

M. Beckmann: Lineare Planungsrechnung
Ludwigshafen 1959 <11, 13, 19, 22 >

E. von Böhm-Bawerk: Kapital und Kapitalzins, 2. Abt. 1. Bd. Positive Theorie des Kapitales
4. Aufl. Jena 1921 < 100 >

E.H. Bowman and R.B. Fetter: Analysis for Production Management
Homewood, Ill. 1957 < 14 >

H. Brandt: Investitionspolitik des Industriebetriebes
Wiesbaden 1959 < 47 >

K. Brandt: Preistheorie, Ludwigshafen 1960 <200 >

H. Brems: Product Equilibrium under Monopolistic Competition, Cambridge Mass. 1951 < 16 >

A. Charnes, W. Cooper, A. Henderson: An Introduction to Linear Programming
New York 1953 < 11, 14 >

C. Churchman, R. Ackoff, E. Arnoff: Introduction to Operations Research New York 1957 < 73, 137 >

W. Cooper: s.u. A. Charnes, W. Cooper, A. Henderson

R. Dorfman, P. Samuelson, R. Solow: Linear Programming and Economic Analysis, New York 1958 < 11, 19 >

Th. Ellinger: Ablaufplanung, Stuttgart 1959 < 5, 100, 103, 116 >

R.O. Ferguson and L.F. Sargent: Linear Programming, Fundamentals and Applications, New York-Toronto-London 1958 <22, 43>

R.B. Fetter: s.u. E.H. Bowman

S. Gass: Linear Programming - Methods and Applications, New York 1958 <11>

E. Gutenberg: Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre Band 1: Die Produktion, 8./9. Aufl.,. Berlin-Göttingen-Heidelberg 1963, < 4, 6, 15, 16, 29, 39, 102, 189, 199 >

A. Henderson: s.u. A. Charnes, W. Cooper, A. Henderson

C.C. Holt, F. Modigliani, J.F. Muth, H.A. Simon: Planning Production, Inventories and Work Force, Englewood Cliffs, N.Y., 1960 <42 >

W. Kilger: Produktions- und Kostentheorie Wiesbaden 1958 < 16, 30 >

K. Knopp: s.u. H.v. Mangoldt

T.C. Koopmans (ed): Activity Analysis of Production and Allocation, New York 1951 < 14, 17 >

W. Krelle: Theorie wirtschaftlicher Verhaltensweisen Meisenheim und Wien 1953 <2 >

G. Kühn: Die Konzernbildung in der Zementindustrie Berlin 1929 <30>

G. Kühn: Konjunktur und Bilanz in der Zementindustrie, Berlin 1937 < 30 >

M. Lohmann: Einführung in die Betriebswirtschaftslehre 2. neubearb. Aufl. Tübingen 1955 < 65 >

J.F. Magee: Production Planning and Inventory Control New York-Toronto-London 1958 < 5, 43 >

H.v. Mangoldt und K. Knopp: Einführung in die höhere Mathematik Band 2, 11. Aufl. Stuttgart 1958 <28>

K. Mellerowicz: Allgemeine Betriebswirtschaftslehre, Band 3, 7. Aufl. Berlin 1952 < 2, 5, 33 >

K. Mellerowicz: Betriebswirtschaftslehre der Industrie 3. Aufl., Band 2, Freiburg 1958 < 69 >

H. Meßmann: Anschauliche Theorie der verbundenen Produktion, Meisenheim und Wien 1952 <65>

G. Meyer: Die Auftragsgröße in Produktions- und Absatzwirtschaft, Leipzig 1941 < 104 >

F. Modigliani: s.u. C.C. Holt u.a.

Ph. Morse: Queues, Inventories and Maintenance New York 1958 <147>

J.F. Muth: s.u. C.C. Holt u.a.

W. Piesch: Produktionsglättung, Entwurf einer Dissertation, Tübingen, unveröffentlicht <42>

H. Poller: Kostenrechnung bei konkurrierender Produktion, Dissertation, Freiburg 1957 <24, 62, 65, 67>

P. Riebel: Die Kuppelproduktion Köln und Opladen 1955 < 65 >

W. Rieger: Einführung in die Privatwirtschaftslehre 2. Aufl. Erlangen 1959 < 2 >

T.L. Saaty: Mathematical Methods of Operations Research New York-Toronto-London 1959 <28>

P. Samuelson: s.u. R. Dorfman, P. Samuelson, R. Solow

C. Sandig: Die Führung des Betriebes - Betriebswirtschaftspolitik, Stuttgart 1953 <1>

L.F. Sargent: s.u. R.O. Ferguson

H.A. Simon: s.u. C.C. Holt u.a.

R. Solow: s.u. R. Dorfman, P. Samuelson, R. Solow

E. Schneider: Theorie der Produktion, Wien 1934 <10>

E. Schneider: Wirtschaftlichkeitsrechnung - Theorie der Investition, Tübingen und Zürich 1957 <2, 47> 2. durchgesehene Aufl.

E. Schneider: Einführung in die Wirtschaftstheorie Teil II, 8. Aufl. Tübingen 1963 <15>

H. v. Stackelberg: Grundlagen der theoretischen Volkswirtschaftslehre, 2. Aufl. Bern-Tübingen 1951 <29, 31>

A. Vaszonyi: Scientific Programming in Business and Industry, New York 1958 <11, 22, 25, 29, 80, 90, 135>

W. Wittmann: Unternehmung und unvollkommene Information, Unternehmerische Voraussicht - Ungewißheit und Planung, Köln und Opladen 1959 <45>

6.2 Aufsätze in Zeitschriften und Sammelwerken

S. B. Akers: "A Graphical Approach to Production Scheduling Problems", Operations Research, Vol. 4 (1956), pp. 244 - 245 <137>

S. B. Akers and J. Friedman: "A Non-Numerical Approach to Production Scheduling Problems", Operations Research, Vol. 3 (1955), pp. 429-442 < 138 >

H. Albach: "Lineare Programmierung als Hilfsmittel betrieblicher Investitionsplanung", Zeitschr. f. handelswiss. Forschung, NF 12. Jg. (1960) S. 526-549 <20>

W. J. Baumol: s.u. R. E. Gomory

E. M. Beale: "A Method for Solving Linear Programming Problems when Some but not All of the Variables must take Integral Values", Technical Report Nr. 19, Princeton University, July 1958 (zitiert nach R. E. Gomory and W. J. Baumol) <54 >

M. Beckmann: "Lineares Programmieren und neoklassische Theorie", Weltwirtschaftliches Archiv, Bd. 84 (1960), S. 39-52 <15, 18 >

Th. Beste: "Die Produktionsplanung", Zeitschr. f. handelswiss. Forschung, Bd. 32 (1938), S. 345-371 <33>

E. H. Bowman: "The Schedule-Sequencing Problem", Operations Research, Vol. 7 (1959), pp. 621-624 < 142, 145 >

K. Bücher: "Das Gesetz der Massenproduktion", Zeitschr. f. d. gesamte Staatswissenschaft, Bd. 66 (1910), S. 429-444 < 126 >

G. Burgermeister und K. Müller: "Die Kostenrechnung als Führungsmittel - Konzeption einer Plan- und Standardkostenrechnung", Unternehmensforschung, Bd. 4 (1960), S. 22-28 <24>

H. Bydekarken: "Die exakte Ermittlung des kürzesten Rundreiseweges ?", Bürotechnik und Automation, 1. Jg. (1960), S. 37-39 <163>

D. Dannerstedt: "Production Scheduling for an Arbitrary Number of Periods given the Sales Forecast in the Form of a Probability Distribution", Operations Research, Vol. 3 (1955), pp. 300-318 < 64 >

S. Danø: "Linear Programming i Produktionsteorien", National Økonomisk Tidsskrift, Teil 1 und 2 Bd. 41 (1955), Teil 3 Bd. 42 (1956) <15>

G.B. Dantzig: "The Programming of Interdependent Activities", Econometrica, Vol. 17 (1949), pp. 200-211; durchgesehen später in: T.C. Koopmans (ed.): Activity Analysis ..., New York 1951 pp. 19-32 <14, 17>

G.B. Dantzig: "Linear Programming under Uncertainty", Management Science, Vol. 1 (1955), pp.197-206 < 64 >

G.B. Dantzig: "On Significance of Solving Linear Programming Problems with Some Integer Variables", Econometrica, Vo. 28 (1960), pp. 31-44 <54>

W. Dinkelbach u. F. Steffens: "Gemischt ganzzahlige lineare Programme zur Lösung gewisser Entscheidungsprobleme", Unternehmensforschung, Bd. 5 (1961), S. 3-14 <54, 146>

A.G. Doig: s.u. A.H. Land

R. Dorfman: "Operations Research", The American Economic Review, Vol. L (1960), pp. 575 -623 <22>

F. Ferschl: "Die Simplexmethode zur Lösung linearer Programme", in: Anwendungen der Matrizenrechnung auf wirtschaftliche und statistische Probleme, Einzelschriften der Deutschen Statistischen Gesellschaft, Nr. 9, Würzburg 1959, S. 184-209 < 14 >

R.B. Fetter: "A Linear Programming Model for Long Range Capacity Planning", Management Science, Vol. 7 (1961), pp. 372-378 < 21 >

J.L. Fisher: "A Class of Stochastic Investment Problems" Operations Research, Vol. 9 (1961), pp. 53-65 < 20 >

M.M. Flood: "The Traveling-Salesman Problem", Operations Research, Vol. 4 (1956), pp. 61-75 < 162 >

J. Friedman: s.u. S.B. Akers

S. Gass: s.u. T.L. Saaty

B. Giffler and G.L. Thompson: "Algorithms for Solving Production-Scheduling Problems", Operations Research, Vol. 8 (1960), pp. 487-503 <139, 141 >

R.E. Gomory: "Outline of an Algorithm for Integer Solutions to Linear Programs", Bull. Am. Math. Soc. 1958 pp. 275-278 (zitiert nach R.E. Gomory and W.J. Baumol) <54 >

R.E. Gomory and W.J. Baumol: "Integer Programming and Pricing", Econometrica, Vol. 28 (1960), pp. 521-550 <54>

E. Gutenberg: "Planung im Betrieb", Zeitschr. f. Betriebswirtschaft, 22. Jg. (1952), S. 669-684 < 3>

F.L. Hitchcock: "The Distribution of a Product from Several Sources to Numerous Localities", Journal of Mathematics and Physics, Vol. 2o (1941), pp. 224-23o < 14>

F.E. Hohn: s.u. F. Modigliani

H.S. Houthakker: "On the Numerical Solution of the Transportation Problem", Operations Research, Vol. 3 (1955), pp. 210 - 214 <14>

B. Jessen: s.u. E. Schneider

S.M. Johnson: "Optimal Two- and Three-Stage-Production Schedules with Set-Up Time Included", Naval Research Logistics Quaterly, Vol. 1 (1954), pp. 61-68 (zitiert nach der folgenden Literaturangabe) <135>

S.M. Johnson: "Discussion: Sequencing n Jobs on Two Machines with Arbitrary Time Lags", Management Science, Vol. 5 (1959), pp. 299-303 <135>

W. Karush and A. Vaszonyi: "Mathematical Programming and Service Scheduling", Management Science, Vol. 3 (1957) pp. 140-148 <37, 39>

W. Karush and L.A. Moody: "Determination of Feasable Shipping Schedules for a Job-Shop", Operations Research, Vol. 6 (1958), pp. 35-55 < 182>

J.E. Kelley Jr.: "Parametric Programming and the Primal-Dual Algorithm", Operations Research, Vol. 7 (1959), pp. 327-334 <56>

W. Kilger: "Produktionsplanung einschließlich Planung des Fertigungsprogrammes", in: Dynamische Betriebsplanung zur Anpassung an wirtschaftliche Wechsellagen, Schriftenreihe der Arbeitsgemeinschaft Planungsrechnung e.V., Bd. 2, Wiesbaden 1959, S. 66-82 < 67>

C.N. Klahr: "Multiple Objectives in Mathematical Programming", Operations Research, Vol. 6 (1958), pp. 849-855 < 21>

A. Klingst: "Optimale Lagerhaltung bei bekanntem Jahresgang des Bedarfs", Unternehmensforschung, Bd. 1 (1956/57), S. 166-172

A. Klingst: "Einführung in die Matrizenrechnung", in: Anwendungen der ... (s. bei F. Ferschl) S. 9-73 <86>

W. Knödel: "Ein verallgemeinertes Transportproblem" Unternehmensforschung, Bd. 4 (1960), S. 1-12 <14>

H. Koch: "Untersuchungen über den Gültigkeitsbereich des Gesetzes vom abnehmenden Ertragszuwachs", Zeitschr. f.d. gesamte Staatswissenschaft, Bd. 106 (1950), S. 309-323 <29>

W. Krelle: "Ganzzahlige Programmierungen. Theorie und Anwendungen in der Praxis", Unternehmensforschung, Bd. 2 (1958), S. 161-175 <51, 53>

W. Krelle: "Überblick über die Problemgruppen der Unternehmensforschung und den Stand der Anwendung", Zeitschr. f. handelswiss. Forschung, N.F. 13. Jg. (1961), S. 335-353 <147>

A.H. Land and A.G. Doig: "An Automatic Method for Solving Discrete Programming Problems", Econometrica, Vol. 28 (1960), pp. 497-520 <51>

A.S. Manne: "On the Job Shop Scheduling Problem", Operations Research, Vol. 8 (1960), pp. 219-223 <142>

O. von Mering: "Linear Programming mit besonderer Berücksichtigung der Simplexmethode", Ordo-Jahrbuch, Bd. IX, 1957, S. 231-247 <21>

A.F. Mester: "Zur Ausnutzung des deutschen Sachkapitals, Zeitreihen von 1925 bis 1938 und 1950 bis 1957", Vervielfältigung V/2/f, 1960, des Ifo-Instituts, München, aus dem Forschungsvorhaben "Langfristige Projektion" <30>

L.G. Mitten: "Sequencing n Jobs on Two Machines with Arbitrary Time Lags", Management Science, Vol. 5 (1959), pp. 293-298 <135>

F. Modigliani and F.E. Hohn: "Production Planning over Time and the Nature of the Expectation and Planning Horizon", Econometrica, Vol. 23 (1955), pp. 46-66 <36>

L.A. Moody: s.u. W. Karush

G. Morgenthaler: "The Theory and Application of Simulation in Operations Research", in: Progress in Operations Research, Vol. 1, edited by R. Ackoff, New York-London 1961, pp. 366-419 < 153 >

K. Müller: s.u. G. Burgermeister

H. Müller-Merbach: "Die Ermittlung des kürzesten Rundreiseweges mittels linearer Programmierung", Ablauf- und Planungsforschung (Operations Research), 2. Jg. (1961), S. 70-83 <162>

H.v. Natzmer: "Traditionelle und moderne Kostenkurven", Zeitschrift für Nationalökonomie, Bd.XXI (1961), S. 37-97 < 30 >

U. Pfaffenberger: "Produktionsplanung bei losreihenfolgeabhängigen Maschinenumstellkosten", Unternehmensforschung, Bd. 4 (1960), S. 29-40 < 105, 157, 177 >

W. Piesch: "Über einige Modelle der Absatzplanung", Unternehmensforschung, Bd. 3 (1959), S. 51-69 <64>

D. Pohmer: "Über die Wechselbeziehungen von Unternehmungskonzentration und Konjunktur", in: Konjunkturelle Stabilität als wirtschaftspolitische Aufgabe, (Schülergabe für Woldemar Koch) herausgegeben von G. Zeitel und J. Pahlke, Tübingen 1962, S. 1-31 <197, 198>

W. Poklekowski: "Probleme inhomogener Massenfertigung", Bürotechnik und Automation, 1. Jg. (1960), S. 93-98 <191>

T.L. Saaty and S. Gass: "Parametric Objective Function", Part 1: Operations Research, Vol. 2 (1954), pp. 316-320; Part 2: Operations Research, Vol. 3 (1955), pp. 395-401 <56>

M.E. Salveson: "A Problem in Optimal Machine Loading", Management Science, Vol. 2 (1956), pp. 233-260 <156>

H. Schlüter: "Zum Problem der optimalen Losgröße", Zeitschr. f. handelswiss. Forschung, NF 6. Jg. (1954), S. 188-203 < 104 >

H. Schneeweiß: "Zur Theorie der Wartesch langen", Zeitschr. f. handelswiss. Forschung, NF 12. Jg. (1960), S. 471-5o7 < 147 >

E. Schneider: "Das Zeitmoment in der Theorie der Produktion", Jahrbücher für Nationalökonomie und Statistik, Bd. 142 (1935), S. 271 ff. und Bd. 144 (1936), S. 129 ff. < 100 >

E. Schneider und B. Jessen: "Absatz, Produktion und Lagerhaltung bei einfacher Produktion", Archiv für mathematische Wirtschafts- und Sozialforschung, Bd. IV, 1938, S. 99-120 <36>

H. Scholz: "Praktische Lösung von Aufgaben der Matrizenrechnung", in: Anwendungen der ... (siehe bei F. Ferschl) S. 235 ff. < 86 >

V. Seifried: "Möglichkeiten und Grenzen der Kostenplanung bei Eisenbahnwerkstätten", Zeitschr. f. Betriebswirtschaft, 24. Jg. (1954), S. 151-167 < 30 >

R. Sisson: "Methods of Sequencing in Job-Shops - A Review", Operations Research, Vol. 7 (1959), pp. 10-29 < 153 >

R. Sisson: "Sequencing Theory", in: Progress in Operations Research, Vol. 1, edited by R. Ackoff, New York-London 1961 pp. 295-326 < 143, 153 >

H. Spilker: "Die Bestimmung der gewinnmaximalen Absatzmengenkombination der Mehrproduktunternehmung und ihre Reaktion auf Nachfrageverschiebungen", Zeitschr. f.d. gesamte Staatswissenschaft, Bd. 112 (1956), S. 632-670) <16>

P. Sraffa: "The Laws of Returns under Competitive Conditions", Economic Journal, Vol. 36 (1936) pp. 535-550 < 29 >

F. Steffens: s.u. W. Dinkelbach

W. Szwarc: "Solution of the Akers-Friedman Scheduling Problem", Operations Research, Vol. 8 (1960), pp. 782-788 <138>

M. Terebesi: "Bemerkungen zum Verfahren von Gomory zur Bestimmung ganzzahliger Lösungen von Linearen Programmen", Unternehmensforschung, Bd. 5 (1961), S. 197-215 < 55 >

G.L. Thompson: s.u. B. Giffler

B. Thüring: "Die exakte Ermittlung des kürzesten Rundreiseweges", Bürotechnik und Automation, 1. Jg. (1960), Sonderheft S. 3-15 < 163 >

A. Vaszonyi: "The Use of Mathematics in Production and Inventory Control I", Management Science, Vol. 1 (1954), pp. 70-85 <82>

A. Vaszonyi: "The Use of Mathematics in Production and Inventory Control II", Management Science, Vol. 1 (1955), pp. 207-223 < 90 >

A. Vaszonyi: s.u. W. Karush

H.M. Wagner: "A Practical Guide to the Dual-Theorem", Operations Research, Vol. 6 (1958), pp. 364-384 <19 >

H.M. Wagner: "An Integer Linear Programming Model for Machine Scheduling", Naval Research Logistics Quarterly, Vol. 6 (1959), pp. 131-140 (zitiert nach R. Sisson "Sequencing Theory") <142>

W. Wenke: "Zur Kalkulation von Kuppelprodukten", Zeitschr. f. Betriebswirtschaft, 31. Jg. (1961), S. 12-19 < 67 >

W. Wetzel: "Bemerkungen zur Rationalisierung betriebswirtschaftlicher Entscheidungen mit Hilfe elektronischer Datenverarbeitungsmaschinen", Unternehmensforschung, Bd. 1 (1956/57), S. 123-133 < 81, 91 >

W. Wetzel: "Theoretische Grundlagen des linearen Programmierens, der Einsatz-Ausstoß-Analyse und der Spieltheorie", in: Anwendungen der ... (siehe bei F. Ferschl) S. 129-183 <11>

H. Winkel: "Das Dual-Problem in der Linearen Planungsrechnung", Unternehmensforschung, Bd. 3 (1959), S. 118-129 < 19 >

W. Wittmann: "Lineare Programmierung und traditionelle Produktionstheorie", Zeitschr. f. handelswiss. Forschung, NF 12. Jg. (1960), S. 1-17 < 15 >

Lebenslauf

Am 24. April 1933 wurde ich als Sohn des Physikers Dr.phil. Joachim Pfaffenberger und seiner Ehefrau Dr.phil. Margarete Pfaffenberger, geb. Samuel, in Berlin-Lankwitz als zweites Kind geboren.

Von 1939 bis 1943 besuchte ich Grundschulen in Berlin-Lichterfelde und Königsberg/Pr.; 1943 und 1944 besuchte ich mit kriegsbedingten Unterbrechnungen Gymnasien in Königsberg/Pr., Wolfskirch/Warthegau und Harrachsdorf/Riesengebirge. Von Juli 1945 bis zur Reifeprüfung am 18.2.1953 war ich Schüler des humanistischen Gymnasiums zu Berlin-Steglitz.

Von Wintersemester 1953/54 bis Wintersemester 1957/58 war ich an der Fakultät für Wirtschaftswissenschaften der Technischen Universität Berlin für die Fachrichtung Wirtschaftsingenieurwesen immatrikuliert; am 21.5.1958 habe ich dort die Diplomprüfung für Wirtschaftsingenieure (Diplom-Ingenieur) bestanden. Vor dem Studium und während des Studiums habe ich ein jeweils halbjähriges kaufmännisches und technisches Praktikum absolviert.

Vom 15.7.1958 bis 31.7.1961 war ich unter den Professoren Dr.rer.pol. Hans Peter und Dr.-Ing., Dr.oec. Carl Föhl wissenschaftlicher Referent im Institut für Angewandte Wirtschaftsforschung, Tübingen. Während der Semester Winter 1958/59 bis Sommer 1961 war ich dort teilweise nur halbtags beschäftigt und gleichzeitig an der Rechts- und Wirtschaftswissenschaftlichen Fakultät der Universität Tübingen immatrikuliert.

Seit 1.8.1961 bin ich wissenschaftlicher Assistent am Betriebswirtschaftlichen Seminar der Universität Tübingen unter Professor Dr.rer.pol. Dieter Pohmer.